Otto Hahn

KÜNSTLICHE NEUE ELEMENTE

VERLAG CHEMIE GMBH

KÜNSTLICHE NEUE ELEMENTE

Vom Unwägbaren zum Wägbaren

Mit einer Einführung in die Geschichte der Kernspaltung

von

OTTO HAHN

2. AUFLAGE

1 9 4 8

VERLAG CHEMIE, GMBH, WEINHEIM/BERGSTR.-BERLIN

Nach einem in der „Gesellschaft Deutscher Chemiker“ in Mülheim a. d. Ruhr am 9. Mai 1947 gehaltenen Vortrag.

Druck: Dr. Johannes Hörning, Heidelberg

Inhaltsübersicht



Allgemeine Vorbemerkungen

Unser Thema handelt von den künstlich gewonnenen neuen chemischen Elementen, und zwar einerseits denen, die die bis vor kurzem bestehenden Lücken innerhalb des Periodischen Systems auffüllen, also den Elementen 43, 61, 85, und andrerseits von den in den letzten Jahren gewonnenen Elementen jenseits Uran, den Elementen 93, 94, 95 und 96.

Vor einer Reihe von Jahren habe ich gelegentlich das Thema behandelt: *„Vom Wägbaren zum Unwägbaren in der Chemie"*. Es wurde gezeigt, wie es allmählich gelang, mit Hilfe empfindlicher Waagen, der Spektralanalyse, der Mikrochemie usw., immer kleinere Mengen chemischer Elemente oder ihrer Verbindungen zu erkennen; wie dann die radioaktiven Methoden einen großen Schritt weiter in das Gebiet des Unwägbaren führten, bis man schließlich mit der Wilson'schen Nebelkammer, dem Geiger-Müller-Zählrohr u. a. zum Nachweis der einzelnen Atome vordrang. Die denkbar mögliche Grenze nach unten war damit erreicht.

Im Gegensatz zu dem Thema „Vom Wägbaren zum Unwägbaren" können wir heute in unserer Betrachtung umgekehrt vorgehen und als Untertitel das Thema wählen: *„Vom Unwägbaren zum Wägbaren in der Chemie"*.

Wir werden sehen, daß es heute möglich ist, künstliche chemische Elemente nicht nur in unsichtbarer, unwägbarer Menge zu gewinnen, sondern auch in dem Chemiker zugänglichen Mengen, in einzelnen Fällen gramm-, ja kilogrammweise. Die Möglichkeit dazu bietet die ins Ungeheure gesteigerte Ausbeute bei der Gewinnung solcher Elemente, wie sie in den U. S. A. in den sogenannten „Uran-Piles" als Folge der Auffindung der Uranspaltung erzielt worden ist.

Voraussetzung für die gewichtsmäßige Herstellung ist einerseits die Gewinnbarkeit durch eine Kettenreaktion, wie sie in dem „Uran-Pile" stattfindet, denn nur in dem „Pile" werden, wie wir sehen werden, genügend große Mengen an künstlichen Elementen gebildet; andererseits müssen die entstehenden Substanzen eine

verhältnismäßig lange Lebensdauer haben, damit sie sich in genügender Menge ansammeln können und nicht vorschnell zerfallen.

Zunächst soll nun einiges über die Grundtatsachen der Kernphysik gesagt werden, soweit es für das Verständnis des späteren notwendig erscheint.

Die Atomkerne aller chemischen Elemente bestehen aus Protonen und Neutronen. Protonen sind die positiv geladenen Kerne des Wasserstoffatoms, Neutronen sind ungeladene Atomkerne mit praktisch der gleichen Masse wie die Protonen. Als „nackte" Atomkerne haben sie keine Elektronenhülle um sich herum, bilden deshalb auch keine chemischen Verbindungen, sondern spielen nur im Kernaufbau der Atome und bei den Kernreaktionen eine Rolle, hier aber eine sehr wichtige.

Es sei daran erinnert, daß die Anzahl der Protonen, also der geladenen Kernbestandteile, die chemische Natur eines Elementes eindeutig festlegt, während die Summe von Protonen plus Neutronen die Masse, das Atomgewicht, bestimmt. Da das Neutron ja keine Ladung besitzt, so ändert ein Mehr oder Weniger an Neutronen nichts an den chemischen Eigenschaften eines Elements, es handelt sich dann nur um „isotope" Atomarten verschiedener Masse, die zu dem durch die positive Kernladung definierten Element gehören und dessen „praktisches Atomgewicht" bestimmen.

Fast alle Elemente, angefangen vom Wasserstoff, der aus dem gewöhnlichen Wasserstoff der Masse Eins und etwa einem 7000-stel „schweren" Wasserstoff der Masse Zwei besteht, bis hinauf zum Uran, sind Mischungen von Isotopen, sogenannte Mischelemente, im Gegensatz zu „Reinelementen", die nur aus einer einzigen Atomart bestehen.

Das natürliche Uran besteht aus drei Isotopen, von denen uns hier nur die beiden wichtigsten, das mit der Masse 238 und das seltenere der Masse 235, interessieren.

Die erste künstliche Umwandlung eines Elements in ein anderes verdanken wir *Rutherford,* der im Jahre 1919 durch Bestrahlen des Stickstoffes mit α-Teilchen den Stickstoff in Sauerstoff umwandelte, wobei ein Proton emittiert wurde. (An der größeren „Reichweite" dieses Wasserstoffkerns gegenüber der der α-Strahlen wurde die Reaktion nachgewiesen.)

In der Schreibweise des Chemikers würde der Vorgang also folgendermaßen dargestellt:

$$^{14}_{7}N + ^{4}_{2}He \longrightarrow ^{17}_{8}O + ^{1}_{1}H$$

(Kernladung links unten, Massenzahl links oben vor dem Symbol des Elements.)

In der Physik schreibt man kürzer so:

$$^{14}_{7}N\ (\alpha,\ p)\ ^{17}_{8}O$$

(α-Teilchen = Heliumkern, p = Proton = Wasserstoffkern.)

Der erste Buchstabe in der Klammer bedeutet immer das aufgenommene Teilchen, der zweite das abgegebene.

Diese heute allgemein übliche Schreibweise einer Kernreaktion wird auch im folgenden beibehalten. Radioaktive Zeitreaktionen werden mit Angabe der Halbwertszeit der sich umwandelnden Substanz und der dabei emittierten Strahlung dargestellt.

In den Beginn der 30er Jahre fallen dann weitere große Entdeckungen: 1932 die des Neutrons durch den englischen Physiker *Chadwick*, in Fortführung von Versuchen von *Bothe* und *Becker* in Deutschland und dem Ehepaar *Joliot-Curie* in Frankreich. Wie schon erwähnt, hat das Neutron, wie der Wasserstoff, die Masse Eins aber die Kernladung Null. Es besitzt also auch kein die positive Kernladung neutralisierendes negatives Elektron der Elektronenhülle.

Die Entdeckung des Neutrons geschah durch Bestrahlen von Beryllium mit α-Teilchen nach der Reaktion $^{9}_{4}Be\ (\alpha, n)\ ^{12}_{6}C$,

oder chemisch geschrieben: $^{9}_{4}Be + ^{4}_{2}He \longrightarrow ^{12}_{6}C + \boxed{n}$

Im Jahre 1934 folgt dann die Auffindung der künstlichen Radioaktivität durch das Ehepaar *Joliot-Curie*. Sie bestrahlten Bor und Aluminium mit α-Teilchen und gewannen dabei einen instabilen, also radioaktiven Stickstoff und einen instabilen, radioaktiven Phosphor. Ein Neutron (n) wurde dabei abgegeben. Die Reaktionen waren folgende:

$$^{10}_{5}B\ (\alpha,\ n)\ ^{13}_{7}N \xrightarrow[10\ \text{min}]{\beta^+} ^{13}_{6}C$$

$$^{27}_{13}Al\ (\alpha,\ n)\ ^{30}_{15}P \xrightarrow[2{,}2\ \text{min}]{\beta^+} ^{30}_{14}Si$$

Die beiden instabilen Atomarten zerfallen rasch weiter unter Abgabe von einem $\beta+$ Teilchen = *positives* Elektron: Die Kernladung des entstehenden Elementes ist eine Einheit kleiner als die des Ausgangselements.

Wirkliche Atomumwandlungen oder besser Kernwandlungen bestehen darin, daß die Zahl der den Kern zusammensetzenden Protonen oder Neutronen sich ändert. Eine Änderung der *Protonenzahl* bedeutet immer eine wahre *Element*verwandlung, denn es ändert sich ja die Anzahl der geladenen Kernbestandteile. Eine Änderung der *Neutronenzahl* bedeutet die Entstehung eines anderen *Isotops* des gleichen Elements, denn es ändert sich ja nichts an der Kernladung, sondern nur am Atomgewicht.

Nach der Entdeckung der Neutronen und der künstlichen Radioaktivität wurde bald erkannt, daß die Neutronen, weil sie keine Ladung haben und deshalb von dem positiv geladenen Atomkern nicht abgelenkt werden, ein besonders günstiges Material für die Atomumwandlungen darstellen.

Der Vorgang einer solchen Atomumwandlung besteht in den meisten Fällen darin, daß das Neutron, wenn es in Kernnähe kommt, von diesem aufgenommen wird, wobei ein Isotop des getroffenen Atoms mit einer um die Masse des Neutrons, also rund eins, vermehrten Masse entsteht. Diese künstlichen Isotope sind aber in den meisten Fällen instabil, sie kommen in der Natur in den gewöhnlichen Mischelementen nicht vor und wandeln sich unter der Emission von β-Strahlen, negativen Elektronen, in das nächsthöhere Element um.

Die Spaltung des Urans

Der italienische Physiker *Fermi,* der als erster die Neutronen für Kernreaktionen verwendet hat, hatte seine Versuche bis zum Uran hinauf ausgedehnt, mit dem Ergebnis, daß er auch hier künstliche, unter Emission von β-Strahlen einhergehende Umwandlungen fand, die nach dem damaligen Stande unserer Kenntnis über die Bindungsfestigkeit hoch geladener Atomkerne zu Elementen jenseits Uran führen mußten. *Hahn* und *Meitner* bestätigten und erweiterten die Versuche, und in Gemeinschaft mit *F. Straßmann* wurden dann in den Jahren 1935—38 eine ganze Reihe für Trans-Urane gehaltene, künstlich radioaktive Atomarten gefunden. Wir mußten aus unseren Ergebnissen schließen, daß wir aktive Vertreter der Elemente 93, 94, 95 und 96 vor uns hatten. Der Beweis dafür wurde darin erblickt, daß diese Substanzen nach ihren chemischen Eigenschaften bestimmt keine Isotope der linken Nachbarn des Urans, also etwa Vertreter der Elemente Protactinium oder Thorium sein konnten; andrerseits gehörten die zahlreichen Atomarten sicher vier verschiedenen chemischen Elementen an. Es galt bei den Physikern für völlig unmöglich, daß ein so hoch geladener Atomkern wie das Uran mit seinen durch die 92 positiven Kernladungen bedingten starken Bindungskräften durch Bestrahlen mit Neutronen zu einem tiefergehenden Zerfall veranlaßt werden könne. Unter den Hunderten von künstlich durchgeführten Kernreaktionen mit fast allen Elementen des Periodischen Systems waren dementsprechend auch immer nur Reaktionen beobachtet worden, bei denen die Reaktionsprodukte entweder Isotope oder allernächste Nachbarn der bestrahlten Elemente vorstellten. Soweit unsere Versuche in den anderen Ländern nachgemacht wurden, wurden sie alle bestätigt.

Im Herbst 1938 fanden Herr *Straßmann* und ich im Anschluß an Versuche von *Curie* und *Savitch* aber recht seltsame Resultate. Wir schieden drei aktive Erdalkalimetalle ab, die wir zunächst für künstliche Radium-Isotope halten mußten. Dies war an sich schon

merkwürdig, denn Radium mit seiner Kernladung 88 ist ja kein nächster Nachbar mehr zum Uran. Aber die Ergebnisse wurden noch unverständlicher. Unsere „Radiumisotope" ließen sich mit keiner der uns lange bekannten Trennungsmethoden für Radium und Barium vom Barium trennen.

Indicatorenversuche, bei denen wir unsere künstlichen „Radiumisotope" mit natürlichen Radiumisotopen mischten und dann die Trennung durchführten, gaben schließlich den Ausschlag. Das „natürliche" Radium ließ sich vom Barium abtrennen, die künstlichen „Radium-Isotope" dagegen nicht. So wurden wir zu dem Schluß gezwungen, daß die bei der Einwirkung von Neutronen auf Uran entstehenden Erdalkali-Isotope gar kein Radium waren, sondern Barium; ein höchst unerwartetes Ergebnis[1]). Das Uran war durch den Beschuß mit Neutronen in zwei mittelschwere Kerne zerplatzt, gespalten. Das eine war Barium, das andere Bruchstück war — wie sich bald herausstellte — Krypton. Ihre Ordnungszahlen 56 und 36 ergänzen sich zu 92.

Meitner und *Frisch* waren die ersten, die den Vorgang dann auf Grund des Bohr'schen Modells der Atomkerne erklärten; von ihnen stammt auch der Ausdruck: Kernspaltung (nuclear fission).

Die Entwicklung ging dann schnell weiter. Sie ist in den deutschen und ausländischen Zeitschriften des Jahres 1939 genau beschrieben.

Als besonders wichtig sei hier schon erwähnt, daß das seltene, im Mischelement Uran nur zu $\frac{1}{140}$ vorkommende, leichtere Uran-Isotop der Masse 235 im wesentlichen für die Spaltreaktionen in Frage kommt. Und zwar erfolgt die Spaltung besonders wirksam durch solche Neutronen, die durch ihre Zusammenstöße mit anderen Atomen ihre ursprünglich große kinetische Energie verloren haben, so daß sie in ihrer Geschwindigkeit gewöhnlichen Gasmolekülen vergleichbar sind.

---

[1]) Ein Einwand, den *Ida Noddack* vor Jahren im Anschluß an die ersten *Fermi*'schen Angaben über Transurane gemacht hatte, nämlich der, man müsse zunächst einmal alle bekannten Elemente des Periodischen Systems ausschließen, bevor man Schlüsse auf Elemente jenseits Uran ziehen könne, war niemals ernstlich diskutiert worden. Er widersprach ja allen Grundlagen der Kernphysik und war natürlich auch durch keinerlei Versuche belegt. *(I. Noddack,* Angew. Chem. 47, 653 [1934].)

Bald wurde erkannt, daß die Spaltprozesse sehr zahlreich sind; es entstehen als Bruchstücke nicht nur Barium- und Krypton-Isotope, sondern zahlreiche andere, wie Strontium und Xenon, Brom und Lanthan, Jod und Yttrium usw. usw. Immer addieren sich die Kernladungen der je zwei Spaltstücke zu 92.

1944 konnten wir im Kaiser-Wilhelm-Institut für Chemie eine Tabelle der Spaltprodukte aufstellen, die sämtliche Elemente von Brom 35 bis Praseodym 59 umfaßte, meist in Form mehrerer Isotope verschiedener Halbwertszeit, die oft noch über eine Anzahl aktiver Zwischenprodukte sich in die stabilen, dann nicht mehr nachweisbaren Isotope der benachbarten höheren Elemente umwandelten [1]).

Ende 1946 erschien in U.S.A. ein sehr umfangreicher Tätigkeitsbericht über die dortigen Arbeiten während des Krieges, aus dem man erkennt, daß die Reihe der Bruchstücke sogar schon beim Zink (Ordnungszahl 30) anfängt und bis zum Europium (Ordnungszahl 63) weitergeht [2]). Diese leichtesten und schwersten Bruchstücke entstehen dabei aber in so geringem Ausmaße, daß sie mit den uns zur Verfügung stehenden Strahlenquellen niemals hätten gefunden werden können.

Die von *Fermi*, von uns und von den andern Kernphysikern vor der Entdeckung der Uranspaltung für Trans-Urane gehaltenen Substanzen waren in Wirklichkeit alles Spaltprodukte des Urans, also aktive Vertreter mittelschwerer Elemente.

Die weiter unten ausführlich zu besprechenden wirklichen Trans-Urane lagen damals noch in so kleinen Mengen vor, daß sie nicht nachweisbar waren.

Neben den Arbeiten über die bei der Uranspaltung auftretenden Elemente gingen die Untersuchungen über die normalen Kernreaktionen der anderen Elemente weiter, also denen, bei welchen aktive Isotope des bestrahlten Elements oder ihre nächsten Nachbarn entstehen, vor allem in Amerika mittels des Cyclotrons, von denen in U.S.A. einige Dutzend, in Deutschland kein einziges vorhanden war. Es bestand also die Möglichkeit zur Gewinnung

---

[1]) Siehe z. B. *O. Hahn*, Veröffentlichungen des Deutschen Wissenschaftlichen Instituts Stockholm No. 1, [1944]; vollständiger bei *W. Seelmann Eggebert* und *F. Straßmann*, Z. Naturforsch. **2a**, 80 [1947].

[2]) „Plutonium Project", J. Amer. chem. Soc. **68**, 2411—2442 [1946].

von aktiven Isotopen fast aller chemischen Elemente, einschließlich der bisher noch fehlenden.

Aber wie steht es mit den Gewichtsmengen, die bei diesen Reaktionen gewonnen werden können? Auch bei Verwendung stärkster Hochspannungsanlagen zur Gewinnung energiereicher Teilchen, wie Protonen, Deuteronen (Kerne des schweren Wasserstoffs), Neutronen, ganz zu schweigen von den Neutronenquellen aus Radium-Beryllium-Mischungen, waren die mittels dieser Strahlen gewonnenen künstlich aktiven Isotope immer weit unterhalb normaler chemischer Nachweisbarkeit oder Wägbarkeit. Auch das große *Lawrence*'sche Cyclotron (der Berkeley-Universität) war bis vor ein paar Jahren nicht imstande, wägbare Mengen zu produzieren. Der Nachweis und die Untersuchung erfolgten immer nach den bei den natürlichen Radioelementen entwickelten Nachweismethoden durch die Ionisationswirkung der von den Substanzen emittierten Strahlen, deren Empfindlichkeit sich in einzelnen Fällen bis auf den Nachweis einzelner Atome steigern läßt. Noch vor gar nicht langer Zeit wirkte es deshalb wie eine Art Sensation, als es amerikanischen Forschern gelang, mit den konzentrierten Neutronenquellen des Berkeley-Cyclotrons durch monatelanges Bestrahlen von Gold mittels Neutronen nach der Reaktion

$$^{197}_{79}\mathrm{Au}\,(\mathrm{n},\gamma)\;^{198}_{79}\mathrm{Au}\;\xrightarrow[2{,}7\,\mathrm{d}]{\beta}\;^{198}_{80}\mathrm{Hg}$$

das entstehende natürliche Quecksilberisotop in solcher Menge zu gewinnen, daß es nach dem Austreiben aus dem bestrahlten Gold in einer Kapillare spektralanalytisch ein paar Minuten lang nachweisbar wurde[1].

Hier wollen wir ja aber nicht nur von der Entstehung neuer chemischer Elemente sprechen, deren Nachweis nur nach kernphysikalischen Methoden gelang, sondern auch von wägbaren, dem normalen Chemiker zugänglichen Mengen. Wie ist das möglich? Es gelang durch die Tatsache, daß bei der Uranspaltung nicht nur mittelschwere Atombruchstücke entstehen, sondern daß dabei zusätzlich Neutronen „abgedampft“ werden, die ihrerseits die Möglichkeit zu einer Kettenreaktion ungeheuren Ausmaßes bieten.

---

[1] *J. H. Wiens* u. *L. Alvarez,* Physic. Rev. **58,** 11, 1005 [1940].

Die Kettenreaktion; der „Uran-Pile"

Ein Neutron, das auf einen Uran-235-Kern trifft, bewirkt dessen Spaltung. Dabei werden zwei bis drei neue Neutronen „abgedampft". Die Spaltung hat uns also nicht nur das anfängliche Neutron sozusagen zurückgeliefert, sondern auch noch zusätzlich neue geschaffen; alle diese Neutronen können ihrerseits neue Spaltungen hervorrufen, wenn es gelingt, daß die Neutronen wirklich wieder das Uran treffen und nicht durch Fremdkörper absorbiert werden oder nach außen entweichen. Aus der ursprünglichen Spaltung eines einzigen Atoms kann also in kürzester Zeit lawinenartig eine ungeheure Vermehrung der Spaltprozesse hervorgehen; eine „Kettenreaktion", die zur Bildung wägbarer Mengen von Spaltprodukten anwächst.

Die Wahrscheinlichkeit, daß bei den Spaltprozessen noch zusätzlich Neutronen freigemacht werden, wurde von *Hahn* und *Straßmann* schon kurz in Erwägung gezogen; einen Beweis dafür haben wir aber nicht erbracht.

Diese Erwägung war insofern naheliegend, als die Atomgewichte der Bruchstücke höher sein mußten als die der höchsten bekannten inaktiven Isotope der Spaltelemente. So sind die Massenzahlen des höchsten stabilen Bariumisotops 138, des höchsten Kryptonisotops 86. Die Summe dieser Massenzahlen ist 224 gegenüber der Masse 236 des durch Aufnahme eines Neutrons zur Spaltung veranlaßten Urans. Die primären Spaltprodukte enthalten hier also 12 Neutronen zuviel. Dies bedingt einerseits die Radioaktivität der Spaltprodukte, die unter Emission von β-Strahlen in Elemente höherer Kernladung (und damit auch höherer Neutronenzahl) übergehen. Andrerseits konnten Überschußneutronen einfach emittiert werden.

Der tatsächliche, experimentelle Beweis dafür, daß bei den Reaktionen zusätzlich Neutronen „abgedampft" werden, wurde zuerst von *Joliot* und Mitarbeitern in Frankreich [1]) und unabhängig davon fast gleichzeitig in U. S. A. erbracht. Die theoretische Möglichkeit der Ausbildung einer Reaktionskette und damit einer technisch verwertbaren Ausnutzung der bei der Spaltung freiwerdenden Energie war damit gegeben [2]).

Die Ausnutzung der Energie konnte man sich dabei in zweierlei Weise denken. Entweder in einer geregelten, gleichmäßig fort-

---

1) *v. Halban, Joliot, Kowarski,* Nature **143,** 470 [1939].

2) *S. Flügge,* Naturwiss. **27,** 402 [1939].

schreitenden Reaktion, dem gleichmäßigen Verbrennen der Kohle in einer entsprechend eingestellten Zentralheizung vergleichbar, oder in einer ungeregelten, sich mit einer ungeheuren Vehemenz steigernden Reaktion, vergleichbar etwa einer Kohlenstaubexplosion größten Ausmaßes.

1942 war es in Deutschland und in U. S. A. bekannt, daß es prinzipiell möglich ist, energieliefernde Maschinen zur Verwertung der Spaltenergie aufzubauen. Es war der Plan der deutschen Kernphysiker, solche als „Uranbrenner" bezeichnete Anordnungen zu entwickeln.

In U. S. A. konzentrierte sich das Interesse während des Krieges darauf, die ungeregelte Reaktion für die Gewinnung höchstwirksamer Sprengstoffe heranzuziehen. Dies ist mit dem natürlichen Isotopengemisch des Urans nicht möglich; denn, wie wir schon gesehen haben, ist für die Spaltung und die damit einhergehende Neutronenemission das seltene Uran-Isotop 235 praktisch allein verantwortlich. Das in viel größerer Menge anwesende Uran 238 wirkt dabei nur hindernd, wie wir gleich sehen werden. Man mußte also das seltene Uran 235 von dem häufigen Uran 238 abtrennen. Als Isotope haben diese aber die gleichen chemischen Eigenschaften. Ihre Trennung voneinander kann nur auf physikalischem Wege, wie Diffusionsmethoden, Massenspektroskopie usw. erzwungen werden, ein sehr zeitraubendes, ungeheure Anlagen erforderndes Vorgehen. (Es wurde aber in U. S. A. erfolgreich durchgeführt.)

Es war aber auch möglich, einen ganz anderen Weg einzuschlagen. Er besteht in der Ausnutzung einer beim Uran 238, also dem häufigen Uran-Isotop, stattfindenden Neutronenreaktion, die zur Entstehung von Elementen höherer Kernladung als Uran sie besitzt, führt. Der Vorgang besteht darin, daß Neutronen bestimmter, nicht sehr hoher Energie durch einen sogenannten „Resonanzprozeß" vom Uran 238 eingefangen werden, dies aber nicht zerspalten, sondern ein künstliches Uran-Isotop der Masse 239 liefern. Dieses künstliche Uran-Isotop emittiert β-Strahlen, wandelt sich also in ein Element 93 um, und aus diesem entsteht durch eine weitere β-Strahlenumwandlung ein Vertreter des Elements 94.

Der erste Schritt zur Aufklärung dieser Vorgänge, nämlich der Nachweis eines künstlichen Uran-Isotops der Masse 239, stammte von *Hahn, Meitner* und *Straßmann*[1]; die Umwandlungsprodukte, also die wirklichen Elemente 93 und 94, wurden aber erst von Amerikanern nachgewiesen. Das Element 93 erhielt dann später den Namen Neptunium, das Element 94 den Namen Plutonium, genannt nach den auf den Planeten Uranus folgenden äußeren Planeten Neptun und Pluto. (Näheres hierüber siehe weiter unten bei den Elementen 93 und 94.)

Nun wurde weiter oben schon erwähnt, daß die von uns seinerzeit für Trans-Urane gehaltenen Reaktionsprodukte sich nach der Entdeckung der Kernspaltung alle als Spaltprodukte des Urans, also mittelschwere Elemente herausstellten. Mit den später in den U. S. A. aufgefundenen wirklichen „Trans-Uranen" hatten unsere Substanzen also nichts zu tun. Die wahren Trans-Urane entstehen aus dem häufigen Uran 238, die früher für Trans-Urane gehaltenen Spaltprodukte aus dem seltenen Uran 235.

Im Mischelement Uran verlaufen also bei der Einwirkung von Neutronen zwei konkurrierende Vorgänge: die Spaltung des Isotops 235 unter Emission zusätzlicher Neutronen und die Anlagerung von Neutronen an das Isotop 238 unter späterer Bildung der Elemente 93 und 94. Während nun das Neptunium-Isotop der Masse 239 ein kurzlebiger Körper ist, ist das daraus entstehende Plutonium-Isotop eine langlebige Substanz. Und diese mußte, ebenso wie das Uran-Isotop 235, durch Einwirken von Neutronen jeder beliebigen Energie gespalten werden, also das Material für einen „Sprengstoff" liefern können. Dieser Schluß ergibt sich aus kernphysikalischen Gründen, nach denen die Isotope ungerader Masse sich leichter spalten als die gerader.

Während nun die Gewinnung von Uran 235 durch Abtrennen von seinem sehr viel häufigeren Isotop 238 eine sehr schwierige Aufgabe ist, war anzunehmen, daß die Abtrennung des Elements 94, also des Plutoniums, vom Element 92, dem Uran, nach normalen chemischen Methoden möglich sein muß. Es kam also darauf an, das Plutonium kilogrammweise im Uran entstehen zu las-

---

[1]) *O. Hahn, L. Meitner, F. Straßmann,* Ber. Dtsch. Chem. Ges. **69**, 905 [1937].

sen und dieses neue Element dann vom Uran zu trennen. Das Material zu einer „Atombombe“ wäre damit gewonnen.

Wie konnte man nun zu großen Mengen der vorerst überhaupt noch nicht hergestellten Substanz kommen? Es war nur möglich durch Verwendung der bei der Spaltung entstehenden, durch die Kettenreaktion ins Ungeheure vermehrten Neutronenbildung und deren Anlagerung an das Uran 238; selbstverständlich unter Verwendung von Tausenden von Kilogrammen reinsten Uranmetalls.

Haben wir etwa einen Block von dem Mischelement Uran vor uns, das so rein ist, daß die Neutronen durch Fremdkörper nicht abgefangen werden, der außerdem so groß ist, daß mehr Neutronen in dem Block bleiben als nach außen entweichen, dann können innerhalb des Uranblocks die beiden Vorgänge verlaufen und sich zu ungeheurer Intensität steigern: die Spaltung von Uran 235 und die Entstehung der die Kette aufrecht erhaltenden Neutronen, außerdem die Anlagerung von Neutronen an das Isotop 238 mit der Entstehung des Plutoniums.

Hier tritt nun aber gleich eine Schwierigkeit auf. Die bei den Spaltprozessen „abgedampften“, zusätzlichen Neutronen haben primär eine sehr große Energie. Mit dieser großen Energie werden diese Neutronen weder an das Uran 238 angelagert, noch wirken sie in erheblichem Maße spaltend auf das Uran 235 ein. Durch Zusammenstoß mit anderen Atomkernen verlieren die Neutronen aber schnell ihre kinetische Energie, und nun tritt bald der Zustand ein, wo die Neutronen gerade die Energie haben, die sie zur Anlagerung an das Uran 238 brauchen. Sie werden als sogenannte „Resonanzneutronen“ aufgenommen, die Plutoniumbildung setzt ein.

Für die Spaltungsprozesse braucht man nun aber vor allem Neutronen noch kleinerer Geschwindigkeit, vergleichbar der der Gasmoleküle etwa bei Zimmertemperatur. Wenn das viele Uran 238 aber die Neutronen schon vorher alle abfängt, dann bleiben für die Spaltprozesse keine mehr übrig. Die Emission zusätzlicher Neutronen hört also auf, die Kette bricht ab. Es müssen also Vorkehrungen getroffen werden, daß die Kette nicht unterbrochen wird, daß also nur ein Teil der Neutronen vom Uran 238 angelagert wird, ein anderer Teil aber für die Spaltung des Urans 235 übrig bleibt. Dies geschieht durch Einlagern von Bremssubstan-

zen, Moderatoren, die einen großen Teil der Neutronen unter die gefährliche „Resonanz-Energie“ herunterbringen, sie verlangsamen, sie selbst aber nicht absorbieren.

Als solche Bremssubstanzen sind „schweres“ Wasser oder reinster Graphit besonders geeignet, weil sie die Neutronen zwar verlangsamen, aber nicht oder kaum absorbieren. Blöcke oder Stäbe aus reinstem Uranmetall werden also zu einer Art Raumgitter in das „schwere“ Wasser oder den Graphit eingebettet, und so kann eine Anordnung getroffen werden, bei der neben der Anlagerung zum Plutonium ein großer Teil der freiwerdenden Neutronen für die Spaltung von Uran 235 verfügbar bleibt; die „Munition“ für die Kettenreaktion wird geliefert. Eine gesteuerte Reaktionsfolge tritt ein.

In der Abbildung ist die hier geschilderte Anordnung noch einmal schematisch dargestellt.

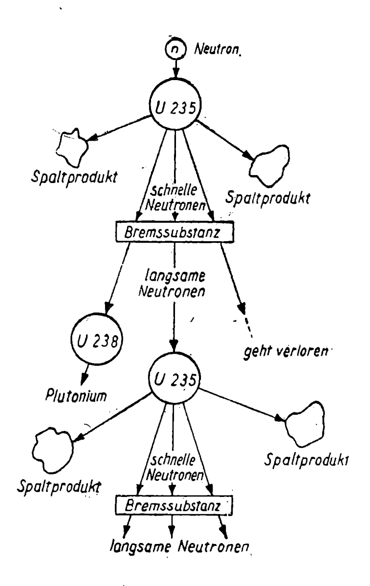


Abbildung 1a. Kettenreaktion in dem Uran-Pile.

Die Abbildung 1a gibt die gesteuerte Reaktion im Uran-Pile. Es wird angenommen, daß bei der Spaltung zusätzlich drei Neutronen entstehen. Eines davon gehe durch Diffusion nach außen oder durch Absorption innerhalb des Piles verloren. Ein zweites Neutron wird an das Uran 238 angelagert und bildet Plutonium; das dritte entkommt der Anlagerung und spaltet weiteres Uran 235, gibt somit die „Munition“ für die Fortführung der Kette.

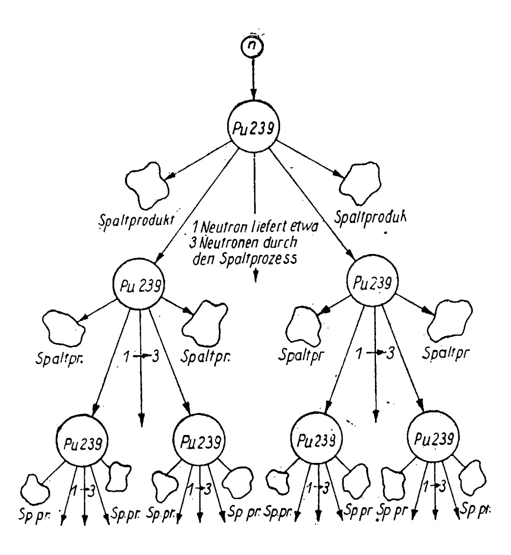


Abbildung 1b. Explosionsartige Kettenreaktion in der Atombombe.

Die Abbildung 1b gibt zum Vergleich ein Bild der ungesteuerten Reaktion. Uran 238 ist nicht vorhanden; als spaltende Substanz dient das Plutonium oder das vom Uran 238 abgetrennte Uran 235. Die Reaktion schaukelt sich mit größter Geschwindigkeit hinauf. Die Explosion der „Bombe" ist die Folge.

Für die in Deutschland geplant gewesenen „Uranbrenner" war schweres Wasser als Bremssubstanz vorgesehen. Derartige Anlagen kamen aber als Energiequellen noch nicht zur Aufstellung. In U. S. A. wurde statt des auch dort in den notwendigen Mengen nicht verfügbaren schweren Wassers reinster Graphit gewählt. Diese Anlagen erhielten den Namen „Uran-Pile".

Alle aktiven Spaltprodukte, soweit sie eine lange Lebensdauer haben, und alle inaktiven Endglieder der Spaltungsreaktionen — es sind mehr als 70 — können jetzt oder in naher Zukunft im „Uran-Pile" gewichtsmäßig gewonnen werden. Darüber hinaus noch Vertreter aller der Elemente, die überhaupt durch Bestrahlen mit Neutronen herstellbar sind. In dem „Uran-Pile" hat man eine Neutronenquelle ungeheuersten Ausmaßes zur Gewinnung dieser Substanzen.

Wir kommen nun zum eigentlichen Thema: den künstlich hergestellten neuen chemischen Elementen.

Aber bevor wir auf die einzelnen Vertreter eingehen, sei darauf hingewiesen, daß es völlig stabile Vertreter des zu beschreibenden Elementes nicht geben kann. Dies hat *Mattauch* zuerst in den nach ihm benannten Isobarenregeln (den späteren „*Mattauch*schen Isobarensätzen") ausgesprochen und theoretisch begründet[1]). Der hier in Frage kommende Satz kann etwa so formuliert werden: Es gibt keine stabilen Isobarenpaare (Isobare = verschiedene chemische Elemente gleicher Massenzahl), deren Kernladung nur um eine Einheit verschieden ist. Nehmen wir z. B. das gleich zu besprechende Element 43. Alle Massenzahlen, die dem Element 43 zugeschrieben werden könnten, sind bereits durch stabile Isotope des tieferen und höheren Nachbarelements vertreten. So ist also kein Platz mehr für ein wirklich stabiles Isotop des Elements 43.

In der Tat sind alle künstlich gewonnenen neuen Elemente radioaktiv. Manche von ihnen wandeln sich aber so langsam um (viel langsamer als Radium), daß man sie praktisch als stabile Grundstoffe ansehen kann.

Nach völlig inaktiven Vertretern in der Natur zu suchen, hat keinen Zweck.

Die künstlichen Elemente

Element 43. Technecium (Tc)

Vertreter des Elementes 43 entstehen aus β-strahlenden, künstlich-aktiven Isotopen des Elementes 42, also aus Molybdän. Diese Molybdän-Isotope können auf verschiedene Weise, z. B. durch Anlagerung von Neutronen an das Mischelement Molybdän gewonnen werden. In erheblicher Intensität entstehen diese Molybdän-Isotope auch bei der Uranspaltung und können dann aus dem bestrahlten Uran nach Zugabe einiger Milligramm eines Molybdänsalzes auf einfachste Weise schnell gewonnen werden. Als β-Strahler wandeln sich diese Molybdän-Isotope alle in Isotope des Elements 43 um, von denen zwei mit Sicherheit als Umwandlungsprodukte von Molybdän-Isotopen nachgewiesen sind, während

---

[1]) *J. Mattauch* Z. Physik **91**, 361 [1934]; Physik. Z. **35**, 567 [1934].

noch drei weitere entstehen, von denen zwei offenbar eine sehr kleine Halbwertszeit haben.

Das zuerst abgeschiedene Isotop war ein 5,9-Stunden-Körper, den *Perrier* und *Segré* als erste aus einem 67-Stunden-Molybdän gewonnen haben[1]. Im Kaiser-Wilhelm-Institut für Chemie *(Hahn* und *Straßmann, Seelmann-Eggebert)* wurden dann die weiteren Isotope nachgewiesen bzw. ihre Existenz sehr wahrscheinlich gemacht.

In der Tabelle 1a sind die Reaktionen mit ihren Halbwertszeiten zusammengestellt. Obgleich es sich hier um absolut unwägbare Mengen handelt, sind die Massenzahlen bis auf die als unsicher eingeklammerte Massenzahl 102 als gesichert anzusehen.

Auf die Methoden, wie man durch verschieden gelenkte Reaktionen in vielen Fällen einen Schluß auf die in Frage kommenden Massenzahlen ziehen kann, kann hier nicht im einzelnen eingegangen werden. Man geht etwa so vor, daß man durch Bestrahlen eines Elements mit verschiedenen Teilchen, wie Neutronen, Protonen, Deuteronen, und auch durch Bestrahlen benachbarter Elemente mit solchen Teilchen die dabei entstehenden Atomkerne auf ihre Eigenschaften hin untersucht und feststellt, durch welche Reaktionen gleiche Produkte entstehen. Aus der Art ihrer Gewinnung auf verschiedenem Wege läßt sich dann sehr oft der Schluß auf die Massenzahl ziehen[2].

Tabelle 1 a

Element 43: Unwägbare Mengen durch Kernspaltung (vor dem „Uran-Pile")

Massenzahl	Mo		**El 43**		Ru		Rh		Pd
↓	42				44		45		46
99	67 h	⟶	5,9 h	⟶	stabil				
101	14,6 min	⟶	14 min	⟶	stabil				
(102)	12 min	⟶	<1 min	⟶	stabil				
105	5 min	⟶	15 min	⟶	4,5 h	⟶	36,5 h	⟶	stabil
107			<1,5 min	⟶	4 min	⟶	24 min	⟶	?

(Die Halbwertszeiten 5 Minuten und 15 Minuten bei der Massenzahl 105 stammen von *Seelmann-Eggebert* aus dem Kaiser-Wilhelm-Institut für Che-

[1] *G. Perrier* u. *E. Segré*, Rend. Accad. Sci. fisiche mat., Napoli **25**, 723 [1937]; J. chem. Physics **5**, 712 [1937].

[2] Wie das für die Spaltprodukte des Urans durch Vergleich mit den nach den bisher üblichen Reaktionen gewonnenen aktiven Isotopen durchführbar ist, siehe: *W. Seelmann-Eggebert* u. *F. Straßmann* l. c.

mie. In dem amerikanischen Bericht (Plutoniumprojekt l. c.) werden dafür keine genaueren Angaben gemacht, sondern sie nur als „kurzlebig“ bezeichnet.)

Perrier und *Segré* waren die ersten, die über die chemischen Eigenschaften des 5,9-Stunden-Isotops des Elements 43 nähere Aussagen machen konnten. Nach diesen Forschern ist die Ähnlichkeit mit dem höheren Homologen Rhenium größer als mit dem niederen Homologen Mangan. So fällt Element 43 sowohl aus verdünnter wie bis zu 5 normaler Salzsäure mit Schwefelwasserstoff aus; aus noch stärkerer Säure ist — im Gegensatz zu Rhenium — die Fällung nicht mehr vollständig. Analog dem Rhenium wird auch das Sulfid des Elements 43 durch Wasserstoffsuperoxyd in alkalischer Lösung zu löslichen Anionen oxydiert, dem Perrhenat entsprechend. Aus dieser Lösung kann man das Element 43 dann nach Zugabe von etwas Natriumperrhenat als Träger mit Nitron (allgem. Reagenz auf Nitrat- und Perrhenat-Ionen) quantitativ ausfallen. Mittels dieser Reaktion wurde im Kaiser-Wilhelm-Institut für Chemie das Element 43 vom Molybdän und anderen Spaltprodukten des Urans, falls solche nicht schon vorher entfernt waren, abgetrennt.

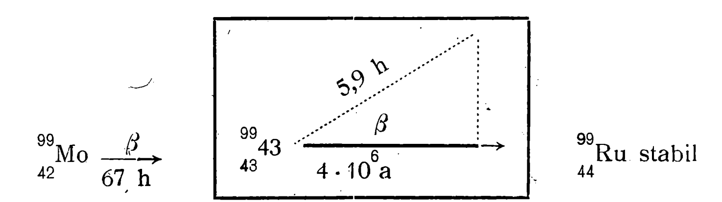
Wie die späteren Untersuchungen in U. S. A. gezeigt haben, ist das 5,9-Stunden-Isotop ein sogenanntes Isomeres zu einem sehr viel stabileren Vertreter des Elements 43. Mit den üblichen — z. B. in Europa verfügbaren — Strahlenquellen ließ sich dieses beständigere Isotop nicht nachweisen. Im Uran-Pile dagegen entsteht es in milliardenmal größerer Intensität. Es ist sehr langlebig, seine Halbwertszeit wird mit $4 \cdot 10^6$ Jahren angegeben!

Das aus dem aktiven Molybdän 99 entstehende Isotop des Elements 43 entsteht zu 10% als „Isomeres“ zunächst in einem „angeregten“ Zustand, der mit der Halbwertszeit von 5,9 Stunden in das stabile langlebige Isotop übergeht; 90% dieses Isotops entstehen unmittelbar. Unter Emission von β-Strahlen wandelt sich dieses, ebenso wie die anderen, kürzerlebigen Isotope der Tabelle 1a allmählich in Ruthen, das nächst höhere Element um.

In der Tabelle 1b ist die nunmehr vollständig sichergestellte Reaktionsfolge der Entstehung des wichtigen Isotops $^{99}_{43}43$ wiedergegeben.

Tabelle 1 b

Element 43: Technecium Symbol Tc. Wägbare Mengen im „Uran-Pile"



Mit dem Nachweis eines derartig langlebigen Vertreters des Elements 43 und seiner Entstehung bei der Uranspaltung ist nunmehr die Möglichkeit der Gewinnung dieser Substanz in für den normalen Chemiker bequemen Mengen gegeben. Bei einer Halbwertszeit von mehr als vier Millionen Jahren ist es ja einige tausendmal beständiger als Radium, verhält sich also praktisch wie ein gewöhnliches chemisches Element.

Da *Perrier* und *Segré* die ersten waren, die ein Isotop des Elements 43 nachgewiesen haben, stand ihnen die Wahl der Namensnennung für dieses Element zu. Sie nennen es „T e c h n e c i u m", aus dem griechischen Wort technetos „künstlich", Symbol Tc.

Ungefähre Abschätzung der gewinnbaren Gewichtsmengen an „Technecium"

Mit einer gewissen Vereinfachung der in dem „Uran-Pile" stattfindenden Reaktionen kann man größenordnungsmäßig auf folgendem Wege zu einer Schätzung kommen. Es geht aus den amerikanischen Berichten hervor, daß bei dem mit reinstem Graphit und reinstem Uranmetall betriebenen Pile bei der in U. S. A. verwendeten Anordnung auf die Entstehung von einem Gewichtsteil Plutonium etwa ein Gewichtsteil Spaltprodukte kommt. Wir wollen annehmen, die Spaltreaktionen geben 70 verschiedene Reaktionsfolgen, die früher oder später in stabile Atomarten des Periodischen Systems übergehen; also 70 stabile Atomarten, zu rund 30 verschiedenen chemischen Elementen gehörig. Genau genommen sind es 85 Reaktionsprodukte mit den Massenzahlen 72 bis 158, zu 34 verschiedenen Elementen gehörend. Aber die nied-

rigsten und höchsten Massenzahlen entstehen in so kleinem Betrage, daß sie bei unserer Überschlagsrechnung fortgelassen werden können.

Da eine Uranbombe, aus Plutonium bestehend, größenordnungsmäßig mindestens 10 kg wiegt, so haben sich bei der Bildung dieser 10 kg Plutonium im Pile nach unserer Annahme auch 10 kg Spaltprodukte, bzw. ihre inaktiven End-Isotope, gebildet, sozusagen als „Asche" des Prozesses. Nimmt man der Einfachheit halber an, daß die Ausbeute für die angenommenen Spaltreaktionen gleich groß ist — was aber sicher nicht der Fall ist —, dann ergäbe sich pro Isotop $\frac{10000}{70}$ g = rund 140 g. Pro Plutoniumbombe je 10 kg würden danach über 100 g des langlebigen Techneciums entstehen! Da heute schon sicher mehr als 10 solcher Plutoniumbomben hergestellt sind, sieht man, daß schon mehr als 1 kg Gewicht des neuen Elements Technecium in den „Uran-Piles" entstanden sein muß.

Es ist zu vermuten, daß man im Laufe der Zeit das neue Element 43 mindestens grammweise gewinnen wird und damit seine chemischen Eigenschaften noch viel ausführlicher studieren kann, als dies seinerzeit *Perrier* und *Segré* mit dem kurzlebigen 5,9-Stunden-Isomeren nach radioaktiven Methoden möglich war.

Element 61

Für das Element 61, die bisher fehlende „seltene Erde" liegen die Verhältnisse nicht ganz so günstig wie für das Element 43.

In einem Bericht von *Seaborg* „Table of Isotopes"[1]) im Januarheft 1944 der „Review of Modern Physics" wurden nicht weniger als fünf künstliche aktive Isotope des Elements 61 angegeben, aber alle nur als wahrscheinlich, nicht als sicher. Ihre Herstellung geschah nach den verschiedensten Bestrahlungsmethoden, meist aus dem Neodym, dem nächst niederen Nachbarelement. Wirklich gesicherte Angaben, mit Angabe der Massenzahlen, finden sich aber erst in dem schon erwähnten ausführlichen Gemeinschaftsbericht des „Plutonium-Project" über die Spaltprodukte des Urans im „Journal of the American Chemical Society" vom November 1946. Auch hier werden insgesamt fünf Isotope angegeben.

---

[1]) *G. T. Seaborg,* Rev. mod. Physics **16,** 1—32 [1944].

Bei zweien von ihnen ist nicht nur die Zugehörigkeit zum Element 61 völlig sicher, sondern auch die Masse bekannt. Diese Isotope sind in der Tabelle 2 mit A bezeichnet. Bei zwei weiteren ist die Elementzugehörigkeit sicher, die Massenzuteilung wahrscheinlich richtig (als B bezeichnet). Das fünfte ist unsicher, als D bezeichnet.

In der Tabelle 2 sind die Daten über das Element 61 zusammengestellt.

Die Masse des Isotops 147 wurde auch im Massenspektrographen festgestellt. (Das 55-h-Isotop des Elements 61 mit der Massenzahl 149 ist in der Tabelle des Plutonium-Projects mit 49 h angegeben. 55 h ist aber der neuere Wert [2]).)

Tabelle 2

Element 61: Alle Isotope im „Uran-Pile" durch Spaltung.

Massenzahl	Nd 60		El 61		Sm 62		Eu 63		Gd 64	Sicherheit des Nachweises
147	11,0 d	⟶	3,7 a	⟶	stabil					A
149	(1,7 h)	⟶	55 h	⟶	stabil					B
151	(kurz)	⟶	12 min	⟶	lang	⟶	stabil			D
153			< 5 min	⟶	47 h	⟶	stabil			A
156			< 5 min	⟶	10 h	⟶	15,4 d	⟶	stabil	B

Wie schwer der einwandfreie Nachweis gerade für das Element 61 ohne die ungeheuren Möglichkeiten des Uran-Piles zu führen gewesen wäre, erkennt man daran, daß von den in der Review of Modern Physics 1944 angegebenen fünf Isotopen des Elements 61 in der neuen Tabelle des „Plutonium-Projects" nicht ein einziges aufgeführt ist. Offenbar gehörten von den damaligen Isotopen keines zum Element 61.

Uns interessiert hier vor allem das I s o t o p d e r M a s s e 1 4 7, denn es ist das stabilste unter ihnen. Die Substanz wandelt sich mit ihren 3,7 Jahren Halbwertszeit etwa 400 mal schneller um als Radium (1600 Jahre Halbwertszeit), ist aber doch 10 mal so stabil wie das Polonium, das längstlebige Isotop des Elements 84.

Wollen wir wie beim Element 43 uns eine Vorstellung über

[2]) Physic. Rev. **71**, 743 [1947].

die von diesem Vertreter des Elements 61 gewinnbaren Gewichtsmengen machen, dann können wir so vorgehen, wie beim Element 43. Wählen wir einen „Uran-Pile“ solcher Größe, daß z. B. in ein paar Monaten 10 kg Plutonium gebildet werden, dann entstehen in grober Annäherung zugleich etwa 10 kg Spaltprodukte; damit der 3,7-Jahre-Körper. Unter der vereinfachenden Annahme gleicher Ausbeute für die rund 70 Reaktionsfolgen würde auf den 3,7-Jahre-Körper also $\frac{1}{70}$ der Gesamtmenge fallen, das sind wieder wie bei Element 43 mehr als 100 g.

Diese Rechnung über die Gewichtsmenge eines zu gewinnenden Spaltproduktes ist aber nur so lange richtig, als die Dauer der Bestrahlung noch klein ist im Vergleich zu der Halbwertszeit der entstehenden Substanz. Für das, wie wir später sehen werden, sehr stabile Plutonium sind ein paar Monate Entstehungszeit sehr kurz im Vergleich zu seiner Halbwertszeit. Aber auch bei dem 3,7-Jahre-Isotop des Elementes 61 trifft noch das gleiche zu. Die sich ansammelnde Menge ist noch ungefähr proportional der Bestrahlungszeit. Bei dem 55-Stunden-Isotop des Elements 61 wäre dies aber nicht mehr der Fall. In 10 Halbwertszeiten, also 10 mal 55 Stunden = 23 Tagen sind 99,9% der Gleichgewichtsmenge entstanden, das Gewicht an diesem Körper würde auch bei fortgesetzter Produktion im Pile nicht mehr größer werden, sondern es würde dann ebensoviel in Samarium zerfallen als aus Neodym entsteht.

Für die G e w i n n u n g   k u r z l e b i g e r   K ö r p e r   h a b e n   d e s h a l b   l a n g e   B e s t r a h l u n g e n   k e i n e n   Z w e c k. Wenn das „radioaktive Gleichgewicht“ erreicht ist, nimmt die Menge nicht mehr zu.

Also auch das Element 61 kann, wenn die einzelnen Spaltprodukte einmal aufgearbeitet werden, grammweise oder, falls notwendig, hundertgrammweise gewonnen werden. Seine Aktivität wäre Gewicht für Gewicht, nämlich im Verhältnis 1600 Jahre zu 3,7 Jahren, mehrere hundertmal größer als die des Radiums. Mit irgendwie größeren Mengen damit zu arbeiten, wäre wegen der starken Strahlung recht gefährlich.

Immerhin wurde durch Bestrahlen dieses 3,7-Jahre-Isotops mit Neutronen in jüngster Zeit noch ein weiteres Isotop des Ele-

ments 61 als Anlagerungsprodukt mit 5,3 Tagen Halbwertszeit gewonnen.

$$^{147}61\ (n,\gamma)\ ^{148}61 \xrightarrow[5{,}3\,d]{\beta} {}^{149}_{62}Sm$$ [1])

Das Isotop 148 ist also sozusagen ein doppelt künstliches Produkt. Über die besonderen chemischen Eigenschaften der neuen seltenen Erde liegen noch keine Angaben vor. Auch ein endgültiger Name wurde noch nicht gewählt.

Element 85: Ekajod, Astatine, (At)

Wir kommen zum Element 85, dem Ekajod. Bei dieser Substanz besteht bisher noch keine Hoffnung, sie in wägbaren Mengen zu erhalten. Es wurde ja schon darauf hingewiesen, daß man wägbare Mengen von künstlichen Atomarten nur in dem Fall erwarten kann, daß die Substanz bei der Kettenreaktion des Urans entsteht und daß sie keine zu kleine Halbwertszeit besitzt. Keine dieser Voraussetzungen trifft für das Element 85 zu. Das Isotop $^{211}_{85}85$ wurde vielmehr von *Corson, Mc. Kenzie* und *Segré*[2]) gewonnen durch Beschießen von Wismut mit α-Teilchen von 32 Millionen E.Volt Energie, also Strahlenteilchen, wie sie bisher nur im *Lawrence*'schen Cyclotron erhalten werden konnten. (Die durchdringendsten α-Teilchen der natürlichen Radioelemente (RaC^1 und ThC^1) besitzen eine Energie von 7,6 und 8,6 Millionen E.Volt. Diese genügt nicht, die abstoßenden Kräfte der Elemente hoher Kernladung zu überwinden.)

Die Reaktion verläuft zunächst folgendermaßen:

$$^{209}_{83}Bi\ (\alpha,2n)\ \boxed{^{211}_{85}At}$$

Die Substanz zerfällt dann mit 7,5 Stunden Halbwertszeit auf zweierlei Weise. Durch Einfang von K-Elektronen aus der Elek-

[1]) Physic. Rev. **72**, 85 [1947]

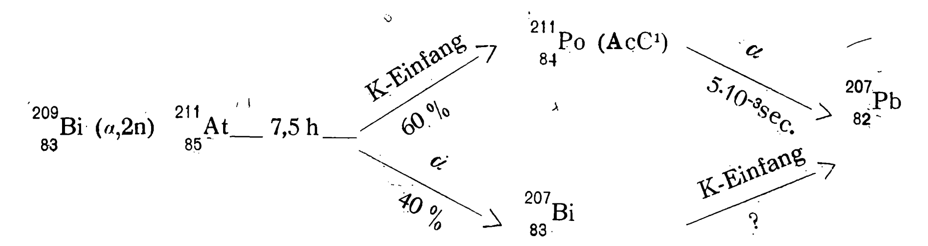
[2]) *Corson, Mc. Kenzie* und *Segré*, Physic. Rev. **57**, 1037 [1940]; **58**, 672 [1940].

tronenhülle in den Kern, wobei dessen positive Ladung um eine Einheit fällt, verwandeln sich etwa 60% davon in Polonium der Masse 211. Dieses ist das in natürlichen Uranmineralien vorkommende kurzlebige AcC^1, das unter Emission von α-Strahlen in Actiniumblei übergeht. 40% des Isotops senden α-Strahlen aus und bilden ein Wismut der Masse 207, das sich seinerseits vermutlich ebenfalls in Actiniumblei verwandelt.

Die Reaktionsfolge sieht also folgendermaßen aus:

Tabelle 3.

Element 85: Astatine (Astat) At



(Bei dem K-Einfang wird ein Elektron aus der Elektronenhülle in den Kern eingebaut, wodurch eine positive Kernladung neutralisiert wird, also das nächstniedere Element entsteht.)

Segré und seine Mitarbeiter schlagen für dieses von ihnen zuerst gewonnene Ekajod-Isotop den Namen Astatine (deutsch: Astat) vor, nach dem griechischen Wort „astator“ für „instabil“ und in Analogie zu dem englischen Namen für die Halogene Chlorine, Bromine, Jodine. (Da alle Elemente von der Kernladung 84 ab instabil sind, läßt sich darüber streiten, ob der Name sehr glücklich gewählt ist.)

In chemischer Beziehung hat dieses Ekajod als Halogen natürlich gewisse Ähnlichkeiten mit seinen niederen Homologen, weicht aber in manchen Reaktionen mehr von den Halogenen ab als diese unter sich abweichen. Erstaunlich ist z. B. seine Fällbarkeit mit Schwefelwasserstoff, selbst aus stark saurer Lösung, oder die elektrochemische Abscheidung auf Zink in schwefelsaurer Lösung. Es ähnelt hier ziemlich stark seinem linken Nachbarn im Periodischen System, dem Polonium.

Analog den Halogenen läßt sich das Ekajod in elementarer Form mit Tetrachlorkohlenstoff ausschütteln, nach der Reduktion mit Schwefeldioxyd und Ansäuern mit Salpetersäure aber nur unvollständig mit Silberionen fällen. Bei der Destillation mit Jod geht auch das Ekajod ins Destillat; zwar nicht so vollständig, wie das Jod, aber doch im starken Gegensatz zu Polonium.

Zusammenfassend kann man sagen, daß das Ekajod eine Art Zwischenstellung zwischen seinen nächst niederen Homologen und seinem linken Nachbarn, dem Polonium, einnimmt.

In allerjüngster Zeit ist außer diesem aus Wismut gewonnenen Isotop des Elements 85 noch ein weiteres künstliches Isotop nachgewiesen worden, und zwar als Glied einer neuen radioaktiven Umwandlungsreihe, die ihren Ursprung in dem später zu besprechenden Neptunium hat (das seinerseits aus dem Uran durch Neutronenbeschuß entsteht). Das Isotop hat die Masse 217 und emittiert α-Strahlen mit einer Halbwertszeit von $2 \cdot 10^{-2}$ Sekunden. Die Stellung dieses neuen Ekajodisotops in der neuen Umwandlungsreihe ist beim Neptunium wiedergegeben.

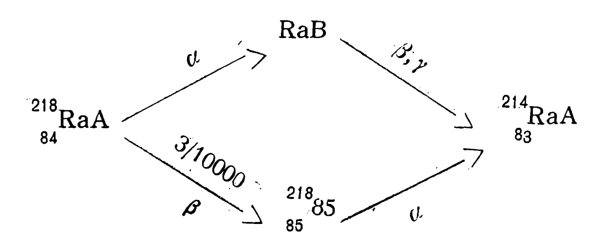
In der Natur vorkommende Isotope des Ekajods (Astatine)

Obwohl nicht zu unserem eigentlichen Thema, der Herstellung künstlicher neuer Elemente gehörig, sollen hier die in natürlichen Uran- bzw. Thormineralien anwesenden Vertreter des Elements 85 erwähnt werden, die von *Karlik* und *Bernert*[1]) vom Wiener Radium-Institut nachgewiesen worden sind. Diese Forscherinnen haben in subtilen Versuchen festgestellt, daß Isotope des Elements 85 als Nebenreaktionen bei der Umwandlung der sogenannten A-Glieder der drei natürlichen Zerfallsreihen auftreten. Der Vorgang ist der, daß neben der normalen α-Umwandlung dieser Polonium-Isotope je ein kleiner Prozentsatz unter Emission von β-Strahlen in ein Isotop des Elements 85 zerfallen; unter Aussenden von α-Teilchen zerfallen sie in die C-Glieder der Hauptreihen nach folgendem Schema:

---

[1]) *B. Karlik* u. *T. Bernert,* Z. Physik. **123,** 51 (1944); Naturwiss. **31,** 298 [1943]; **33,** 23 [1946].

Tabelle 4



Das Abzweigungsverhältnis beträgt beim RaA und ThA nur drei bzw. ein Zehntausendstel; beim AcA ist es noch kleiner.

Die Reichweite der α-Strahlen, nachgewiesen durch ein vierstufiges Röhrenelektrometer, entspricht denen, die man für die Massenzahlen 218, 216 und 215 erwarten soll, entsprechend ihrer Entstehung aus Radium A, Thorium A und Actinium A.

Karlik und *Bernert* haben ihre Untersuchungen erst nach der Herstellung des künstlich aktiven Isotops von Element 85 durch die amerikanischen Forscher durchgeführt. Das Recht der Namensgebung für das Element 85 hatten also die Amerikaner. Immerhin gebührt *Karlik* und *Bernert* das Verdienst, diese in der Natur vorkommenden Isotope des Elements 85 als erste nachgewiesen und die Art ihrer Entstehung festgestellt zu haben.

Element 87: Francium (Fr.)

Beim Element 87 liegen die Verhältnisse ähnlich wie beim Element 85. Es besteht bisher keine Aussicht, wägbare Mengen davon zu bekommen. Bis in allerjüngste Zeit war auch nur ein in der Natur vorkommendes Isotop bekannt, so daß es eigentlich nicht zu unserem Thema, den künstlichen Elementen, gehört. Der Vollständigkeit halber und wegen seiner Bedeutung als bisher einzigem Vertreter des Elements 87, Eka-Cäsium, soll es in dieser Zusammenstellung nicht fehlen. Die Substanz wurde von *Mlle Perey* [1]) als Abzweigungsprodukt des Actiniums (El 89) vor einer Reihe von Jahren aufgefunden. Während das Actinium normalerweise unter β-Strahlenemission in das Thor-Isotop Radioactinium übergeht, wandelt sich etwa 1% des Actiniums unter α-Strahlenabgabe in ein Isotop des Elements 87 um. (Bei α-Strahlenemission sinkt ja die Kernladung um 2, die Masse um 4 Einheiten.)

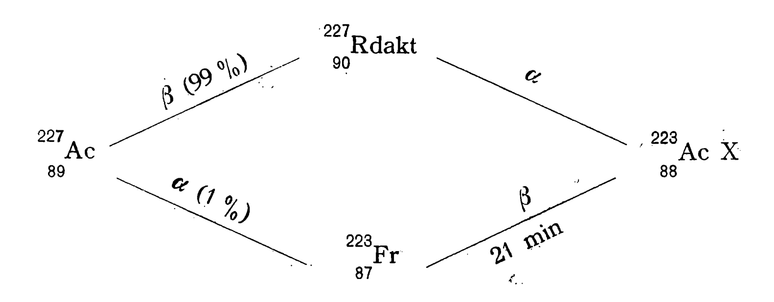
Die Substanz ist ein β-Strahler mit einer Halbwertszeit von 21 Minuten. Aus ihr entsteht das lange bekannte, auch aus dem α-strahlenden Radioactinium sich bildende AcX. Das Reaktionsschema ist das folgende:

---

[1]) *M. Perey,* J. Physique Radium **10**, 435, 439 [1939].

Tabelle 5

Element 87: Francium (Fr.)



Seinen Eigenschaften nach verhält sich das Element 87 so, wie man es für ein höheres Alkalimetall erwarten sollte. Statt des von Frl. *Perrey* anfangs gewählten vorläufigen Namens Actinium K schlägt die französische Entdeckerin dieses bis vor kurzem einzigen Isotops des Elements 87 jetzt den Namen **Francium**, Symbol **Fr**, vor[1]). Aus seiner Entstehung ergibt sich seine Masse zu 223.

Zu diesem bisher einzigen Vertreter des Elements 87 kommt nun noch ein kurzlebiges Glied der beim Element 85 bereits genannten neuen radioaktiven Umwandlungsreihe des Neptuniums (siehe daselbst). Es hat eine Halbwertszeit von rund 5 Minuten, die Masse 221, emittiert α-Teilchen und bildet damit das kurzlebige Astatine-Isotop der Masse 217.

Element 93: Neptunium (Np)

Unwägbare Mengen

Die zunächst von *Fermi*, später von *Hahn, Meitner* und *Straßmann* für Trans-Urane gehaltenen und eingehend studierten Substanzen hatten sich nach der Entdeckung der Uranspaltung alle als künstlich aktive Vertreter n i e d e r e r chemischer Elemente herausgestellt. Nach dem damaligen Stande unserer Kenntnisse über die schweren Kerne war der Schluß auf Trans-Urane ja zwingend gewesen, und erst durch die Erkenntnis der Bildung von Barium aus Uran kam das ganze Gebäude der damaligen „Trans-Urane" ins Wanken und sehr bald zum Zusammenbruch.

[1]) Vgl. *F. Paneth*, Nature **159**, 8 [1947].

Aber eine von uns aufgefundene Reaktion mußte eindeutig zu einem Vertreter des Elements 93 führen. Es war die β-Strahlen-Umwandlung eines schon oben erwähnten künstlich aktiven Uran-Isotops von 23 Minuten Halbwertszeit, das nach einwandfreien chemischen Methoden von *Hahn, Meitner* und *Straßmann* völlig eindeutig als Uran-Isotop festgestellt werden konnte [1]. (Die anderen, scheinbar zu Trans-Uranen führenden für Uran-Isotope gehaltenen kurzlebigen β-Strahler von *Fermi* hatten bei ihrer Halbwertszeit von weniger als 1 Minute chemisch nicht einwandfrei identifiziert werden können; aber der Schluß von *Fermi* auf Uran-Isotope schien vor der Uranspaltung zwingend zu sein und war auch von uns übernommen worden.)

Als β-Strahler mußte unser 23-Minuten-Isotop also in einen Vertreter des Elements 93 übergehen. Wir haben dieses Umwandlungsprodukt gesucht, es aber nicht gefunden. Unsere Strahlenquellen, die damals nur aus Ra-Be-Röhrchen bestanden, waren zu schwach. Die Substanz wurde dann in U. S. A. von *Mc. Millan* und *Abelson* [2]) als β-Strahler von 2,3 Tagen Halbwertszeit nachgewiesen, wobei die β-Strahlung zugleich darauf hinwies, daß aus diesem ersten Trans-Uran ein weiteres, also ein Isotop des Elements 94, entstehen mußte. Eine Strahlung dieser Substanz wurde zunächst aber noch nicht gefunden; sie hatte offenbar eine lange Halbwertszeit. Je größer die Halbwertszeit, desto kleiner ist, Gewicht für Gewicht, die Strahlung. (Uran sendet 3 Millionen mal weniger Strahlen pro Zeiteinheit aus, als eine gleiche Gewichtsmenge Radium. Man hat also eine 3 Millionen mal größere Halbwertszeit.)

Der 2,3-Tage-Körper wurde von *Mc.Millan* und *Abelson* nach den in der Radiochemie mit unwägbaren Substanzmengen üblichen Methoden auch schon auf seine chemischen Eigenschaften hin untersucht, und es zeigte sich dabei eine bemerkenswerte Ähnlichkeit mit dem Uran, so daß eine früher von *Niels Bohr, V. M. Goldschmidt* u. a. diskutierte Vermutung, daß in der Nähe des Urans eine den seltenen Erden vergleichbare Gruppe von Elementen untereinander ähnlicher Eigenschaften aufträte, eine

---

[1]) *L. Meitner* u. *O. Hahn,* Naturwiss. **24,** 158 [1936]; *O. Hahn, L. Meitner* u. *F. Straßmann,* Ber. Dtsch. Chem. Ges. **69,** 905 [1936]; **70,** 1374 [1937].

[2]) *Mc. Millan* u. *Abelson,* Physic. Rev. **57,** 1185 [1940].

starke Stütze fand. Bemerkenswert war, im Unterschied zum Uran, die leichtere Überführbarkeit in den 4-wertigen Zustand, wodurch auch die Trennung vom Uran durchgeführt werden konnte.

Das Element 93 erhielt dann, wie oben schon erwähnt, von den Entdeckern des 2,3-Tage Isotops den Namen „N e p t u n i u m“ (Symbol Np), nach dem Planeten Neptun, dem auf den Planeten Uranus folgenden nächsten Planeten.

In anderer Weise als die amerikanischen Forscher hat dann *Starke*[1]) den 2,3-Tage-Körper vom Uran abscheiden können, und *Hahn* und *Straßmann*[2]) konnten, als ihnen eine bescheidene Hochspannungsanlage zur Gewinnung stärkerer Präparate zur Verfügung stand, den 2,3-Tage-Körper unschwer gewinnen, eine ganze Anzahl seiner chemischen Eigenschaften festlegen und einen genauen Trennungsgang ausarbeiten, mittels dessen man dieses Isotop des Elements 93 nicht nur vom sechswertigen Uran, sondern auch vom vierwertigen Thorium und den zahlreichen Spaltprodukten radioaktiv rein herstellen kann.

Der T r e n n u n g s g a n g ist etwa folgender: Die das Element 93 und die zahlreichen Spaltprodukte enthaltende Uranlösung wird mit Schwefeldioxyd kurz erhitzt: damit Überführung des Elements 93 in den 4-wertigen Zustand; das Uran bleibt 6-wertig. Abtrennung der Hauptmenge des Urans als Uranylnatriumacetat, frei von Element 93. Im Filtrat wird der geringe Rest von Uran mit dem Element 93, dem Uran X und einem Teil der Spaltprodukte durch Fällung mit Ammoniak von den vielen Neutralsalzen abgetrennt, in Salpetersäure gelöst und mit Kaliumbromat das Element 93 in den 6-wertigen Zustand übergeführt. Durch möglichst vollständige Entfernung des Urans mit Natriumacetat werden nunmehr Uran u n d das Element 93 von den restlichen Spaltprodukten und dem Hauptteil Uran X getrennt. Die geringen Mengen Uran + Uran X werden aus schwach essigsaurer Lösung mit 8-Oxychinolin (Oxin) gefällt. Das Element 93 bleibt dabei quantitativ in Lösung; es ist nunmehr frei von Uran, Uran X und den Spaltprodukten. Die Oxinlösung wird durch Ammoniak schwach ammoniakalisch gehalten und durch längeres Kochen von Oxin befreit. Die Entfernung des Oxins muß vollständig erfolgen, weil das Element 93 sonst nicht mehr quantitativ ausfällt. Aus der oxinfreien Lösung kann das Element 93 nunmehr quantitativ durch Ammoniak gemeinsam mit einigen Milligramm Eisen, Zirkon oder dergl. als Träger abgeschieden werden.

---

[1]) *K. Starke,* Naturwiss. **30,** 107 [1942].

[2]) *O. Hahn* u. *F. Straßmann,* Naturwiss. **30,** 256 [1942].

1940 wurde noch ein weiteres Isotop des Elements 93 aufgefunden [1]), und zwar durch Bestrahlen von Uran mit Deuteronen in dem großen *Lawrence*'schen Cyclotron. Unter Aufnahme des Deuterons und Abgabe zweier Neutronen entsteht ein I s o t o p d e s E l e m e n t s 9 3 mit der Masse des bestrahlten Urans 238. Diese Substanz hat eine Halbwertszeit von zwei Tagen, emittiert β-Strahlen und wandelt sich also, wie das 2,3-Tage-Isotop der Masse 239, in ein Isotop des Elements 94 um. Und in diesem Falle gelang es auch bald, das Element 94 als α-Strahler von etwa 50 Jahren Halbwertszeit nachzuweisen, das in das im Mischelement Uran in äußerst kleiner Gewichtsmenge vorkommende Uran 234 zerfällt.

In der Zwischenzeit war von japanischen Forschern [2]) noch ein neuer Umwandlungsprozeß beim Uran nachgewiesen worden, der ebenfalls zu einem Vertreter des Elements 93 führen mußte. Durch Einwirken sehr energiereicher Neutronen auf das Uran werden diese nicht von dem Uran aufgenommen, sondern reißen umgekehrt aus dem Uran noch ein weiteres Neutron heraus. Es entsteht also aus dem Uran 238 nicht, wie bei der oben erwähnten Anlagerung ein Uran-Isotop 239, sondern eines von der Masse 237. Dieses ist, wie das 23-Minuten-Uran, ebenfalls ein β-Strahler — Halbwertszeit 7 Tage —, muß sich also ebenfalls in das nächst höhere Element, also ein Isotop des Neptuniums, umwandeln; vermutlich von langer Lebensdauer, sonst wäre es gleich gefunden worden.

In der Tabelle 6a sind die Reaktionen, wie sie v o r der Aufstellung des Uran-Piles bekannt waren, aufgezeichnet.

Tabelle 6a

Element 93: Neptunium, unwägbar (vor Uran-Pile)

$^{238}_{92}$U (n, γ)	$^{239}_{92}$U	$\xrightarrow[23\ min]{\beta}$	$^{239}_{93}$Np	$\xrightarrow[2,3\ d]{\beta}$	94
$^{238}_{92}$U (n, 2n)	$^{237}_{92}$U	$\xrightarrow[7\ d]{\beta}$	$^{237}_{93}$Np	$\longrightarrow$	?
$^{238}_{92}$U (d, 2n)	$^{238}_{93}$Np	$\xrightarrow[2,0\ d]{\beta}$	94 $\xrightarrow[50\ a]{\alpha}$		

1) *Seaborg, Mc.Millan, Wahl* u. *Kennedy* 1940 zitiert bei „The impact of Nuclear Chemistry" von *G. T. Seaborg,* Ind. Engng. Chem., News Edit. **24,** 1192 [1946].

2) *Nishina, Yasaki, Kimura, Ikawa,* Physic. Rev. **58,** 661 [1940].

Weiter oben wurde schon darauf hingewiesen, daß, nachdem einmal erkannt war, daß die Ausnutzung einer energieliefernden Kettenreaktion möglich sei, die ganze wirtschaftliche Kraft in U. S. A. darauf konzentriert wurde, die Kernenergie zur Gewinnung höchst wirksamer Sprengstoffe auszunutzen. Eine Möglichkeit dazu bot die Abtrennung genügend großer Mengen von Uran 235 aus Uran 238, eine sehr schwierige und langwierige Operation, weil nur durch Isotopentrennung durchführbar. Die andere Möglichkeit bot sich in dem Uran-Pile mit der Herstellung des offenbar langlebigen Umwandlungsprodukts des 2,3-Tage-Neptuniums, also des damals noch unbekannten Isotops des Elements 94 mit der Masse 239. Von dieser Substanz mit ihrer ungeraden Massenzahl mußte erwartet werden, daß sie ebenso von Neutronen beliebiger Energie gespalten würde wie das Uran 235 und damit ebenfalls das Material für einen Sprengstoff liefern würde. Bei der Besprechung des Elements 94 werden wir auf die konzentrierten Anstrengungen zur Gewinnung dieses Elements näher eingehen.

Die im Uran-Pile bei den Spaltprozessen immer wieder freiwerdenden Neutronen werden zunächst als sehr energiereiche Teilchen geliefert. Diese Teilchen sind, wie wir gesehen haben, befähigt, dem Uran 238 ein weiteres Neutron zu entreißen und das oben genannte 7-Tage-Uran-Isotop zu bilden. Wenn diese Reaktion gegenüber der Anlagerung eines Neutrons zum 23-Minuten-Uran der Masse 239 auch stark zurücktritt, so hat die ungeheure Ausbeutevermehrung bei der Bildung künstlicher Atomarten im Pile doch hingereicht, das vor der Aufstellung des Uran-Piles nicht nachgewiesene Neptunium-Isotop der Masse 237 als sehr beständige Substanz mit einer Halbwertszeit von $2{,}25 \cdot 10^6$ Jahren nachzuweisen, abzuscheiden und genau zu untersuchen. Der Körper emittiert α-Strahlen, bildet bei seinem Zerfall also nicht das nächst höhere Element, sondern geht über in ein Isotop des Elements 91, Protactinium, mit der Massenzahl 233. (Dieses letztere Isotop war schon vor der Auffindung der Uranspaltung von *Meitner, Hahn* und *Straßmann* durch Bestrahlen von Thorium mit verlangsamten Neutronen aufgefunden worden[1].)

---

[1]) *L. Meitner, F. Straßmann,* u. *O. Hahn,* Z. Physik **109**, 538 [1938]; *O. Hahn* u. *F. Straßmann,* Naturwiss. **29**, 285 [1941].

Das α-strahlende Neptunium-Isotop der Masse 237 ist mit seiner nach Millionen Jahren zählenden Halbwertszeit ein Element, das sich wie ein gewöhnliches chemisches Element verarbeiten läßt. Trotz der geringen Ausbeute im Uran-Pile, verglichen mit den Ausbeuten an Elementen, die bei der Bestrahlung mit verlangsamten Neutronen bevorzugt entstehen, waren von diesem Neptunium-Isotop 1946 bereits einige 100 Milligramm an Gewicht hergestellt worden.

Die Reaktionsfolge für die Entstehung dieses langlebigen Neptunium-Isotops ist also die folgende:

Tabelle 6 b

Neptunium, wägbar (im Uran-Pile)

$$^{238}_{92}\text{U}\ (n,2n)\ \ ^{237}_{92}\text{U} \xrightarrow[7\,d]{\beta} \boxed{^{237}_{93}\text{Np} \xrightarrow[2{,}25 \cdot 10^{6}\,a]{\alpha}}\ \ ^{233}_{91}\text{Pa}$$

Die mittels unwägbarer Mengen nach radiochemischen Methoden untersuchten Eigenschaften des Neptuniums konnten mit den größeren, aus dem Uran-Pile gewonnenen Mengen natürlich noch sehr viel genauer untersucht werden. Eine Anzahl reiner Verbindungen wurden hergestellt. So gibt es in Analogie zu den Uranylsalzen Neptunylsalze, isomorph mit den entsprechenden Uranverbindungen, und außer der vorher schon festgestellten 4- und 6-Wertigkeit des Elements konnten auch 5- und 3-wertige Verbindungen gewonnen werden mit einer Tendenz, die 4-wertige Oxydationsstufe bevorzugt zu bilden.

Neue künstlich-radioaktive Reihe (4 n + 1)

Durch die Möglichkeit, gewichtsmäßige Mengen eines reinen Neptunium-Isotops herzustellen, konnte nun auch das weitere Geschehen seiner Umwandlungsprodukte bis zum inaktiven Endprodukt aufgeklärt werden. Aus dem Neptunium entsteht eine große Folge künstlich aktiver Atomarten; und da sich unter diesen auch je ein Vertreter der neuen Elemente Francium und Astatine befinden, sei auf diese neue radioaktive Reihe noch kurz eingegangen.

Die in der Natur in Uran- und Thormineralien seit langem bekannten drei großen radioaktiven Familien haben ihren Ursprung

im Uran 238, Uran 235 und Thorium 232; ihre Massenzahlen sind 4n + 2, 4n + 3 und 4n, wo „n" eine ganze Zahl ist (also für Uran 238 z. B. 4 · 59 + 2, für Thorium 4 · 58 usw.). Eine 4n + 1-Reihe ist bei den natürlichen Radioelementen nicht bekannt.

Die ersten Vertreter der fehlenden 4n + 1-Reihe wurden von *Hahn* und *Meitner* und von *Meitner, Hahn* und *Straßmann* aufgefunden. Durch Anlagerung eines Neutrons an das Thorium 232 entsteht ein β-strahlendes Thor-Isotop der Masse 233, also ein Vertreter der 4n + 1-Reihe [1]), und aus diesem ein Protactinium-Isotop der gleichen Masse [2]). Da auch dieses Isotop ein β-Strahler ist, muß es sich in ein Uran der Masse 233 umwandeln.

Die Reaktionsfolge ist folgende:

$$^{232}_{90}\mathrm{Th}\ (n,\gamma)\ ^{233}_{90}\mathrm{Th} \xrightarrow[23\ \mathrm{min}]{\beta} {}^{233}_{91}\mathrm{Pa} \xrightarrow[27\ \mathrm{d}]{\beta} {}^{233}_{92}\mathrm{U} \longrightarrow$$

Mit unseren schwachen Strahlenquellen konnten wir dieses Uran-Isotop nicht nachweisen. Mit den im Uran-Pile zur Verfügung stehenden ungeheuren Neutronenintensitäten wurde es als langlebiger α-Strahler festgestellt (Halbwertszeit 1,6 · 10^5 Jahre!). Das gleiche Uran-Isotop entsteht nun auch aus dem Neptunium über das schon erwähnte Protactinium-Isotop, dessen Entstehung wir auch nach der Entdeckung der Kernspaltung noch einmal kontrolliert und bestätigt haben [3]).

Das langlebige künstliche Uran 233 wandelt sich nun weiter um, und man kann diese neue 4n + 1-Reihe entweder bei diesem Uran-Isotop, besser wohl aber bei dem noch stabileren Neptunium beginnen lassen.

Die Reihe hat dann folgendes Aussehen:

$$^{237}_{93}\mathrm{Np} \xrightarrow[2{,}2\cdot10^{6}\mathrm{a}]{\alpha} {}^{233}_{91}\mathrm{Pa} \xrightarrow[27\ \mathrm{d}]{\beta^-} {}^{233}_{92}\mathrm{U} \xrightarrow[1{,}6\cdot10^{5}\mathrm{a}]{\alpha} {}^{229}_{90}\mathrm{Th} \xrightarrow[10^{4}\ \mathrm{a}]{\alpha}$$

$$\longrightarrow {}^{225}_{88}\mathrm{Ra} \xrightarrow[14\ \mathrm{d}]{\beta} {}^{225}_{89}\mathrm{Ac} \xrightarrow[10\ \mathrm{d}]{\alpha} {}^{221}_{87}\mathrm{Fr} \xrightarrow[5\ \mathrm{min}]{\alpha} {}^{217}_{85}\mathrm{At} \xrightarrow[2\cdot10^{-2}\ \mathrm{sec}]{\alpha} {}^{213}_{83}\mathrm{Bi}$$

In dieser Reihe finden sich die weiter oben bereits erwähnten

---

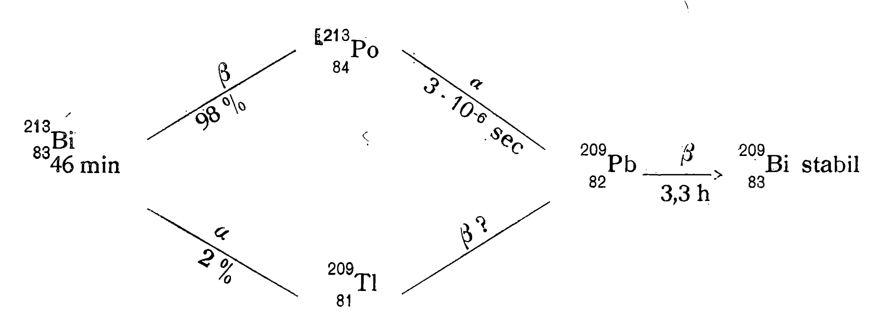
[1]) *O. Hahn* u. *L. Meitner,* Naturwiss. **23,** 320 [1935].

[2]) *L. Meitner, O. Hahn* u. *F. Straßmann,* Z. Physik **109,** 538 [1938].

[3]) *O. Hahn* u. *F. Straßmann,* Naturwiss. **29,** 285 [1941].

neuen Elemente Francium und Astatine; Francium mit 5 Minuten, Astatine mit $2 \cdot 10^{-2}$ Sekunden Halbwertszeit. An eine Herstellbarkeit in wägbaren Mengen ist also nicht zu denken.

Für spezieller Interessierte ist hier noch der weitere Verlauf der neuen $4n + 1$-Reihe angegeben:



Die Aufklärung dieser langen künstlichen Umwandlungsreihe geschah wohl gleichzeitig in dem *Argonne National Laboratory* in Chicago [1]) und in der *Division of Atomic Energy,* Chalk River, Ontario, Canada [2]), je durch eine größere Anzahl von Chemikern und Physikern. Die Veröffentlichung erfolgte in allerjüngster Zeit.

Element 94: Plutonium (Pu)

Von allen künstlich gewonnenen neuen chemischen Elementen ist das Element 94 zweifellos das wichtigste, und die Geschichte seiner ersten Herstellung in wägbaren Mengen ist besonders interessant und für den Chemiker lehrreich.

Daß ein sehr stabiles Isotop mit der Ordnungszahl 94 und der Masse 239 entstehen mußte, schloß man schon gleich nach der Auffindung des 2,3-Tage-Isotops des Elements 93. Denn der 2,3-Tage-Körper sendet ja β-Strahlen aus, muß sich also in das Element 94 umwandeln. Und da dieses Isotop sogar aus den sehr starken 2,3-Tage-Präparaten, die mit dem Cyclotron gewinnbar waren, nicht gleich aufgefunden wurde, war zu schließen, daß das gesuchte Isotop wenig Strahlen aussendet, also eine lange Halbwertszeit haben müsse.

---

[1]) Physic. Rev. **72**, 252 [1947].
[2]) Physic. Rev. **72**, 253 [1947].

Beim Neptunium wurde aber schon erwähnt, daß bei der Bestrahlung von Uran 238 mit Deuteronen unter Aufnahme der Deuteronen und Abgabe zweier Neutronen ein Neptunium-Isotop entsteht, das sich in einen Vertreter des Elements 94 umwandelt, mit der günstigen Halbwertszeit von 50 Jahren. Bei einer Halbwertszeit von 50 Jahren war es einerseits mit den in U. S. A. zur Verfügung stehenden Deuteronenintensitäten unschwer, das Isotop mit der Massenzahl 238 in genügender Menge zu gewinnen, so daß es durch seine α-Strahlen leicht nachweisbar war. Andererseits konnte man damit arbeiten, ohne daß es merklich an Intensität abnahm.

Natürlich handelte es sich dabei noch nicht um wägbare Mengen; aber nach den Methoden der Radiochemie (tracer methods) konnte man auch hier, wie vorher bei dem 2,3-Tage-Neptunium, schon die wichtigsten Aufschlüsse über die chemische Natur des Elements 94 gewinnen. Wie Element 93 ähnelt auch das Element 94 dem Uran, insofern es auch in dem 6- und 4-wertigen Zustande auftritt. Aber eine Tendenz zur 4-Wertigkeit (und sogar zur 3-Wertigkeit) war bei Element 94 noch stärker ausgeprägt als bei Element 93, und es bedurfte stärkerer Oxydationsmittel, um es in die höheren Oxydationszustände überzuführen. Immerhin ist das Plutonium auch als Plutonyl-ion existenzfähig und hierbei, wie die Neptunylverbindungen, mit den Uranylverbindungen isomorph.

In konsequenter Fortführung der Namensgebung für das Element 93 Neptunium wurde Element 94 **Plutonium** genannt.

Mit dem Nachweis dieses Plutonium-Isotops mittlerer Beständigkeit, das sich nur mittels des Cyclotrons, aber nicht im Uran-Pile gewinnen ließ, war das Interesse an dem noch unbekannten langlebigen Umwandlungsprodukt des 2,3-Tage-Neptuniums der Masse 239 noch ganz gewaltig gestiegen, und 1941 wurde dieses dann auch als ein α-Strahler von 24 000 Jahren Halbwertszeit in der „University of California“ aufgefunden [1].

Die außerordentliche Wichtigkeit dieses als praktisch stabiles Element anzusehenden Plutonium-Isotops wurde in U. S. A. gleich darin gesehen, daß es sicherlich, wie das Uran 235, mit Neutronen jeder Energie spaltbar sein müsse, bei Herstellung genügender

[1] *Seaborg, Segré, Kennedy* u. *Lawrence*, zitiert bei *Seaborg*: „The Impact of Nuclear Chemistry“ l. c.

Mengen also einen Sprengstoff höchster Brisanz bilden würde. Seine Abtrennung vom Uran konnte nach chemischen Methoden geschehen, mußte aber doch viel einfacher sein als die Trennung des Urans 235 von seinem Isotop Uran 238.

Die vereinten Bemühungen der amerikanischen Physiker gingen nun daran, die Anordnung aufzubauen, in der einerseits hinreichende Mengen an Plutonium aus dem Anlagerungsprozeß der Resonanz-Neutronen an U 238 entstünden, andererseits genügend Spaltprozesse mit U 235 eine kontinuierlich laufende Kettenreaktion ermöglichten. Das Ergebnis war der „Uran-Pile" (siehe oben).

Die Bemühungen der Chemiker mußten darauf gerichtet sein, Methoden zur Abtrennung des dem Uran ähnlichen Plutoniums bei gleichzeitiger Abtrennung der gefährlichen, weil ungeheuer stark aktiven Spaltprodukte auszuarbeiten.

Da diese Abscheidungsmethoden genau bekannt sein mußten, um die riesenhaften Anlagen für die Gewinnung großer Mengen Plutonium richtig und zweckentsprechend zu planen und aufzubauen, wurde zunächst versucht, mittels der größten Cyclotrone, die in U. S. A. zur Verfügung standen, solche Mengen an Plutonium 239 zu gewinnen, daß man dessen Verhalten nicht nur nach den in diesem wichtigen Fall nicht für genügend sicher gehaltenen radiochemischen tracer-Methoden studieren konnte, sondern mit wägbaren Mengen, wenn auch noch so kleinen.

Dies gelang durch mehrere Monate langes Bestrahlen von „Hunderten von Pfund" Uran mit Neutronen, mit dem Erfolg, daß zunächst einige Tausendstel Milligramm, später ein ganzes Milligramm an Plutonium gewonnen wurde!

Zum ersten Mal waren mit dem Einsatz aller verfügbaren Mittel wirklich wägbare Mengen eines chemischen Elements künstlich hergestellt worden. Mittels neu ausgearbeiteter sogenannter „ultramikrochemischer" Methoden wurden die Untersuchungen mit Tausendsteln Milligrammen durchgeführt und die Trennungsprozesse mit diesen kleinsten Mengen so ausgearbeitet, daß die Riesenanlagen für die Gewinnung von Kilogrammen Plutonium danach aufgebaut werden konnten und die Anlagen fertig dastanden, als in den „Piles" das Material entstanden war.

In dem Bericht von *Seaborg:* „The Impact of Nuclear Chemistry“ [1]) werden diese ultramikrochemischen Methoden genauer beschrieben und Abbildungen über die apparativen Hilfsmittel gebracht. „Reagenzgläser“ und „Bechergläser“ von $\frac{1}{10}$ bis $\frac{1}{100\,000}$ cm^3 in Form feinster Kapillaren wurden verwendet mit entsprechenden Pipetten und Mikromanipulatoren. Besonders konstruierte Mikrowaagen mit einer Empfindlichkeit von $2 \cdot 10^{-8}$ g bei einem Meßbereich von $2 \cdot 10^{-8}$ g und einer Tragfähigkeit von 0,5 mg werden beschrieben. Feste Niederschläge, durch Ausschleudern von den Lösungen getrennt, von 10^{-7} bis 10^{-5} g Gewicht, wurden untersucht. Selbst das reine Plutoniummetall wurde in dieser kleinen Menge gewonnen und in seinem Verhalten untersucht.

Mit berechtigtem Stolz weist *Seaborg* in seinem Bericht darauf hin, daß das Verhältnis zwischen den Mengen bei den ultramikrochemischen Versuchen, auf Grund deren die großen Trennanlagen gebaut wurden, zu den später in den Anlagen abgetrennten Mengen sich wie $1 : 10^{10}$ verhielt, eine außerordentliche Leistung der zahlreichen hierfür eingesetzten Wissenschaftler.

Nicht nur eine ganze Anzahl reiner Plutoniumverbindungen, sondern auch das reine Metall waren also mit kleinen Bruchteilen von Milligrammen hergestellt worden mit dem Ergebnis, daß schon damit die Chemie des Plutoniums „ebenso gut oder besser bekannt war als die Chemie mancher gewöhnlicher chemischer Elemente des Periodischen Systems“, Verbindungen im 6-, 5-, 4- und 3-wertigen Zustand waren hergestellt, und, wie schon oben betont, war erkannt worden, daß der 4-wertige Zustand des Plutoniums der bevorzugte ist.

Mit der Gewinnung größerer Mengen von Plutonium im Uran-Pile können statt dem Arbeiten in mikroskopischem Ausmaß die normalen chemischen Methoden Verwendung finden, so daß die Eigenschaften des Elements und seiner Verbindungen den Eingeweihten sicher bis ins einzelne bekannt sind. Je nach der Wertigkeitsstufe sind die Lösungen des Elements verschieden gefärbt. Lösungen der vierwertigen Verbindungen sind im allgemeinen orange oder braun (mit Ausnahme des Nitrats, dessen Lösung grün ist). Dreiwertige Verbindungen sind leuchtend blau. In den Wertigkeiten 3, 4, 6 sind die Eigenschaften dem

[1]) *Seaborg,* Ind. Engng. Chem., News Edit. l. c.

3-wertigen Lanthan, dem 4-wertigen Thorium, dem 6-wertigen Uran zu vergleichen.

Die analytische Gewichtsbestimmung erfolgt meist mit den 4-wertigen Verbindungen etwa als $Pu(SO_4)_2$, PuO_2, $Pu(O_3)_4$. Die Bestimmung kann aber auch auf radioaktivem Wege erfolgen. Aus der Halbwertszeit von 24 000 Jahren ergibt sich, daß pro Milligramm Pu $1{,}6 \cdot 10^8$ α-Teilchen pro Minute emittiert werden. Durch Zählen der α-Teilchen in einer für die Zählung geeigneten dünnen Schicht läßt sich der Gehalt an Pu also unmittelbar ablesen[1]).

In den Uran-Piles sind seit 1945 sicher Hunderte von Kilogrammen Plutonium gewonnen worden: Bei seiner langen Halbwertszeit von 24 000 Jahren in nicht zu großen Mengen eine völlig harmlose Substanz, mit der man ohne jede Gefahr oder Sorge von Strahlenschädigung arbeiten kann. Erst nach Erreichen der kritischen Größe, bei der mehr Neutronen in der Substanz verbleiben als nach außen entweichen, entsteht der furchtbare Sprengstoff, dessen Wirkung die Welt erschüttert hat.

Welches die kritische Größe zum Eintreten der die Explosion verursachenden Kettenreaktion des Plutoniums ist, wurde bisher nicht veröffentlicht. Die Schätzungen schwanken zwischen 10 und höchstens 30 kg, volumenmäßig also etwa von der Größe einer Kegelkugel, einer Kokosnuß oder noch kleiner.

In zwei Hälften zerteilt würden diese Stücke also noch ganz ungefährlich sein. Prinzipiell erfolgt die Explosion dann, wenn die beiden Hälften möglichst schnell aneinander gebracht werden, etwa durch Aufschießen der einen Hälfte auf die andere. Irgendeine besondere Zündung ist nicht nötig; denn einzelne Neutronen sind überall vorhanden, und ein einziges genügt, um die Kette zum Anlaufen zu bringen.

Kommen die Teile nicht sehr schnell zusammen, dann würde bei der beginnenden Reaktion ein großer Teil des Bombenmaterials verdampfen und der Zerspaltung entzogen. Um diesen Verlust möglichst herabzusetzen, ist deshalb die ganze Anordnung sicherlich noch durch feste und die Neutronen zurückstreuende Metallwände gepanzert. Einzelheiten sind hierüber nicht bekanntgegeben.

Nehmen wir an, daß bei der Explosion nur 20% des Materials gespalten werden und 80% durch vorzeitiges Verdampfen des Plutoniums für

---

[1]) Diese Angaben sind einem Vortrage von *H. J. Emeléus* entnommen: „Some Aspects of Nuclear Chemistry", The Royal Institute of Chemistry, London 1947.

die Reaktion verloren gehen, dann erhalten wir aus 10 kg Pu rund 2 kg Gewicht einer Mischung der verschiedensten aktiven Isotope gewöhnlicher chemischer Elemente!

Im Augenblick der Explosion und auch unmittelbar danach muß die Strahlenwirkung ein fast unvorstellbares Maß annehmen. Die genannten rund 2 kg künstlich aktiver Spaltprodukte sind zum großen Teile als Anfangsglieder der aktiven Umwandlungsreihen [1]) kurzlebige Substanzen oft nur von Sekunden oder Minuten Halbwertszeit. Ein Milligramm Gewicht einer Substanz von z. B. 1 Minute Halbwertszeit hätte, verglichen mit der Aktivität von 1 mg Radium, dessen Halbwertszeit 1600 Jahre beträgt, eine Strahlungsstärke von 1600 · 365 · 24 · 60 mg Ra. Das sind rund 800 kg Ra für 1 mg der Substanz; und unter den 2 kg befinden sich viele derartig kurzlebiger Stoffe!

Diese ungeheure Aktivität nimmt aber wegen der Kurzlebigkeit der meisten künstlichen Spaltprodukte sehr schnell ab. Aber es sind ja auch Substanzen von Tagen, Monaten und Jahren Halbwertszeit festgestellt worden, und deren Aktivität verschwindet natürlich nur allmählich, ist aber auch Gewicht für Gewicht entsprechend kleiner.

Die bisher genannten Plutonium-Isotope, das ^{238}Pu und das ^{239}Pu sind beides α-Strahler; sie zerfallen also in Uran-Isotope der Masse 234 (das aus der natürlichen Radioaktivität seit langem bekannte U II) und in U 235.

Ein drittes, sehr wichtiges Plutonium-Isotop wurde von *Seaborg* [2]) und Mitarbeitern noch durch Bestrahlen des Urans mit den äußerst energiereichen α-Strahlen von 40 Millionen e.Volt des Berkeley'schen Cyclotrons gewonnen. Unter Aufnahme des α-Teilchens und Abgabe eines Neutrons entsteht ein Plutonium-Isotop der Masse 241:

$$^{238}_{92}\mathrm{U}\ (\alpha,\ n)\ ^{241}_{94}\mathrm{Pu}$$

Dieses Plutonium-Isotop ist ziemlich langlebig und emittiert β-Strahlen. Es muß dabei also ein Isotop des nächsthöheren Elements 95 entstehen. Bevor wir auf dieses neue Trans-Uran zu sprechen kommen, seien hier die drei Reaktionen, die zu der Entstehung des Plutoniums führen, zusammengestellt.

---

[1]) Siehe z. B. die Tabellen in den oben genannten Arbeiten von *Seelmann-Eggebert* und *Straßmann* l. c., *O. Hahn* l. c., Plutonium-Project l. c.

[2]) *G. T. Seaborg,* l. c.

Tabelle 7

Element 94: Plutonium (Pu)

$^{238}_{93}Np$	$\xrightarrow[2{,}0\ d]{\beta}$	$^{238}_{94}Pu$	$\xrightarrow[50\ a]{\alpha}$	$^{234}_{92}U$ II
$^{239}_{93}Np$	$\xrightarrow[2{,}3\ d]{\beta}$	$^{239}_{94}Pu$ $\xrightarrow[24000a]{\alpha}$		$^{235}_{92}U$
$^{238}_{92}U$ (α, n)		$^{241}_{94}Pu$	$\xrightarrow[\text{zieml. langleb.}]{\beta}$	95

Element 95: Americium (Symbol, Am)

Wie wir aus der Tabelle 7 ersehen, entsteht durch Bestrahlen von Uran mit äußerst energiereichen α-Teilchen ein β-strahlendes Plutonium der Masse 241. Sein Umwandlungsprodukt ist ein Isotop des Elements 95 mit der Masse 241. Es emittiert α-Strahlen mit einer Halbwertszeit von 500 Jahren, fällt dabei also zurück in das langlebige, α-strahlende Neptunium 237.

Das Element 95 erhielt von *Seaborg* den Namen Americium (Gründe für diesen Namen siehe weiter unten).

Da das Element nicht bei einem Neutronenprozeß entsteht, kann es nicht im „Uran-Pile“ hergestellt werden. Es ist also vorerst nicht zu erwarten, daß man es, wie das Plutonium oder auch das Neptunium grammweise oder gar kilogrammweise gewinnen kann.

Wie aber einem Bericht von *Seaborg* zu entnehmen ist[1]), scheint das Americium als Am $(OH)_3$, also Americiumhydroxyd, durch *Cunningham* in einer Menge von Bruchteilen eines Milligramms bereits erhalten worden zu sein. Die Methode war wohl ähnlich wie die bei der Gewinnung der ersten gewichtsmäßigen Mengen von Plutonium: Ausnützung der wirksamsten und größten Cyclotrone zur Gewinnung stärkster α-Strahlenquel-

---

[1]) Referat eines Vortrags in der Rochester Section der Amer. Chem. Soc. vom 18. Nov. 1946.

len, lange Bestrahlung von Uran zur Gewinnung des β-strahlenden Pu-Isotops, Abscheidung und Reindarstellung des Elements 95 nach den bei dem Plutonium ausgearbeiteten ultramikrochemischen Methoden. (Bei der Bestrahlung mit α-Teilchen kann man allerdings nicht beliebig dicke Schichten von Uran verwenden, denn selbst die 40 Millionen e-Volt α-Teilchen werden schon in dünnen Schichten Uran völlig absorbiert. Andererseits hat man die unmittelbar vom Cyclotron gelieferten Teilchen zur Verfügung, während die Neutronen erst durch einen Kernprozeß aus den geladenen Cyclotronteilchen [meist Deuteronen] gewonnen werden müssen.)

Die Tendenz der Dreiwertigkeit tritt beim Americium gegenüber den Elementen 93 und 94 noch stärker hervor. Genauere Einzelangaben fehlen naturgemäß noch bei dieser schwer zugänglichen Substanz.

Sehr wichtig ist es aber, daß es gelungen ist, durch den üblichen Neutronen-Anlagerungsprozeß aus dem $^{241}_{95}Am$ ein weiteres $^{242}_{95}Am$ herzustellen, und während das Isotop 241 α-Strahlen emittiert und dabei in ein Element 93 zurückfällt, emittiert das Am 242, wie die meisten durch Neutronenanlagerung entstandenen aktiven Atomarten, β-Strahlen, so daß der Aufbau der transuranischen Elemente noch weitergeht.

In der Tabelle 8 sind die beiden zu Americium-Isotopen führenden Reaktionsfolgen aufgezeichnet:

Tabelle 8

Element 95: Americium (Am)

$$^{238}_{92}U\ (\alpha,\ n)\ \ ^{241}_{94}Pu \xrightarrow[\text{zieml. langlebig}]{\beta} \boxed{^{241}_{95}Am \xrightarrow[500\ a]{\alpha}}\ \ ^{237}_{93}Np$$

$$^{241}_{95}Am\ (n,\ \gamma)\ \ \boxed{^{242}_{95}Am \xrightarrow[18\ h]{}}\ \ 96$$

Element 96: Curium (Cm)

Aus dem 18-Stunden-Americium-Isotop der Masse 242, das sich durch Neutronenanlagerung an das verhältnismäßig stabile Ame-

ricium 241 gewinnen läßt, entsteht durch β-Strahlung ein Vertreter des Elements 96. Das Element erhielt von *Seaborg* den Namen Curium. (Wegen des Namens siehe weiter unten.)

Aus der Art seiner Entstehung aus $^{242}_{95}$Am hat dieses Curium-Isotop also ebenfalls die Masse 242. Es zerfällt unter Emission von α-Strahlen mit einer Halbwertszeit von 5 Monaten zurück in das Plutonium der Masse 238.

Noch auf einem anderen Wege ließ sich dieser Vertreter des Elements 96 gewinnen, und zwar durch Bestrahlen des Plutoniums 239, also desjenigen Isotops, das im „Uran-Pile" kilogrammweise hergestellt wurde, mit den energiereichsten α-Strahlen des Berkeley-Cyclotrons, wobei α-Strahlen aufgenommen, ein Neutron in Freiheit gesetzt werden, also durch einen (α, n)-Prozeß.

Erstaunlicherweise entsteht nach der gleichen Methode noch ein weiteres Curium-Isotop, und zwar dadurch, daß nicht nur ein, sondern drei Neutronen bei der Einwirkung der α-Strahlen abgegeben werden, also durch einen (α, 3n)-Prozeß. Dem neuen Isotop ist demnach die Masse 240 zuzuordnen.

Dieses Curium-Isotop hat nur 1 Monat Halbwertszeit; es emittiert ebenfalls, wie das 5-Monat-Isotop, α-Teilchen, fällt also vermutlich in ein Plutonium 236 zurück.

In der Tabelle 9 sind die Reaktionen, die zum Curium führen, zusammengestellt.

Tabelle 9

Element 96: Curium (Cm)

$$^{241}_{95}\text{Am}\,(n,\gamma)\quad ^{242}_{95}\text{Am}\ \xrightarrow[18\text{ h}]{\beta}\ ^{242}_{96}\text{Cm}\ \xrightarrow[5\text{ mo}]{\alpha}\ ^{238}_{94}\text{Pu}$$

$$\text{oder aus}\quad ^{239}_{94}\text{Pu}\,(\alpha, n)\quad \boxed{^{242}_{96}\text{Cm}\ \xrightarrow[5\text{ mo}]{\alpha}}\quad ^{238}_{94}\text{Pu}$$

$$\text{außerdem}\quad ^{239}_{94}\text{Pu}\,(\alpha, 3n)\quad \boxed{^{240}_{96}\text{Cm}\ \xrightarrow[1\text{ mo}]{\alpha}}\quad ^{236}_{94}\text{Pu}$$

Da diese Isotope des Elements 96 indirekt (über das Americium) oder direkt (aus dem Plutonium) durch α-Strahlenreaktionen

entstehen, ist vorerst nicht zu erwarten, daß man das Element 96 in wägbaren Mengen wird erhalten können; der „Pile", der die wägbaren Mengen liefert, ist ja keine Quelle für intensive α-Strahlen.

Die chemischen Eigenschaften des Elements 96 wurden deshalb nur nach den Methoden der Radiochemie festgestellt, also in hochverdünntem Zustand der zu untersuchenden Substanz durch die Strahlen, die es emittiert.

Würde man die bisher aufgefundenen Curium-Isotope übrigens in wägbaren Mengen gewinnen können, dann wären sie gefährliche und sicherlich schwer zu handhabende Substanzen wegen ihrer sehr starken Radioaktivität. Mit seinen 5 Monaten Halbwertszeit sendet das stabilere der beiden Isotope, Gewicht für Gewicht betrachtet, mehr als 3000 mal mehr α-Teilchen aus als das Radium. Vermutlich wird auch eine starke γ-Strahlung gleichzeitig emittiert. Konzentrierte Lösungen des Elements würden sich stark erwärmen, würden das Wasser zersetzen, durch den radioaktiven Rückstoß würden Tröpfchen einer konzentrierten Lösung nicht zusammenbleiben, sondern allmählich verspritzen; sicher ein recht schwieriges Arbeiten.

Aber zur Feststellung der Eigenschaften genügen ja die radiochemischen Methoden, wie sie ja auch für die Mehrzahl der natürlichen Radioelemente, und bis vor wenig Jahren für alle künstlichen Radioelemente genügen mußten.

Was bei den bisher besprochenen Elementen 93, 94 und 95 sich schon deutlich gezeigt hatte, wird durch das Curium bestätigt: Die zunehmende Stabilität der dreiwertigen Verbindungen, was nach Angabe der amerikanischen Verfasser beim Curium soweit führt, daß es praktisch nur noch dreiwertig vorkommt.

Einige Bemerkungen über die Stellung der Trans-Urane im Periodischen System

Bei den immer noch verhältnismäßig spärlichen Angaben über die chemischen Eigenschaften der einzelnen Trans-Urane kam eines klar zum Ausdruck: Die mit steigender Ordnungszahl zu-

nehmende Bevorzugung des vier- und dreiwertigen Zustandes der Elemente gegenüber dem hauptsächlich sechswertigen Uran, die so ausgesprochen ist, daß das Element 96 offenbar praktisch nur noch als rein dreiwertig anzusprechen ist.

Daß diese Elemente chemisch sich nicht wie die höheren Homologe des Rheniums und der Platinmetalle, also wie Eka-Rhenium, Eka-Osmium, Eka-Iridium usw., verhalten, war schon vor der Gewinnung wägbarer Mengen völlig sichergestellt. Mit Schwefelwasserstoff aus saurer Lösung fiel keines von ihnen aus; und die besondere Ähnlichkeit des Elements 93 mit dem Uran hatten Herr *Straßmann* und ich in Übereinstimmung mit den amerikanischen Forschern [1]) sehr bald festgestellt, nachdem uns durch eine Hochspannungsanlage das 2,3-Tage-Isotop zugänglich war. Im oxydierten Zustande ging es bei der charakteristischen Fällung des Urans als Uranylnatriumacetat offenbar mischkristallähnlich mit in den Niederschlag, wodurch es sich von den vielen Spaltprodukten leicht trennen ließ. Andererseits ließ es sich z. B. mit schwefliger Säure leichter reduzieren als das Uran und konnte auf diese Weise vom Uran getrennt werden (siehe weiter oben bei Element 93).

Die schon lange vor der Entdeckung der Trans-Urane von *Niels Bohr* und anderen Forschern ausgesprochene Vermutung, daß in der periodischen Anordnung der Elemente, etwa beim Uran, eine der Gruppe der „Seltenen Erden“ entsprechende, also eine innere Elektronenschale auffüllende Gruppe chemisch ähnlicher Elemente auftreten könne, wurde also schon durch die allerersten Versuche mit den unwägbaren Mengen von Element 93 bestätigt. Nur war es nicht klar, wo die Gruppe ihren Anfang hat. *Mc.Millan* und *Abelson,* die Entdecker des ersten Neptunium-Isotops, und auch Herr *Straßmann* und ich hielten es zunächst für wahrscheinlich, daß die Reihe beim Uran anfängt, man bei den Trans-Uranen also vom Beginn einer „Uranidengruppe“ sprechen könnte. *Victor M. Goldschmidt* und unabhängig von ihm *Ephraim* ließen die Reihe auf Grund spektralanalytischer Analogien zwischen dem vierwertigen Uran und dem vierwertigen Thorium schon beim Thorium beginnen. Uns selbst schien dies aus chemischen

---

[1]) *Mc.Millan* u. *Abelson,* l. c.

Gründen unwahrscheinlich, weil das zwischen dem vierwertigen Thorium und dem meist sechswertigen Uran stehende Element 91, das Protactinium, sich offenbar in den meisten Reaktionen als fünfwertig erwies und sich von den Elementen 90 und 92 viel leichter trennen ließ als die seltenen Erden voneinander.

Mit der späteren Entdeckung der Elemente 94, 95 und 96 und der Gewinnung des Elements Neptunium und Plutonium, also der Elemente 93 und 94, in leicht zugänglichen Gewichtsmengen wurden die verschiedenen Wertigkeitsstufen und die anderen Eigenschaften der Trans-Urane aber viel genauer untersucht als man es früher für möglich gehalten hatte. Und nach der Auffassung von *Seaborg* scheint es jetzt am wahrscheinlichsten, daß die Reihe ähnlicher Elemente schon beim Element 89, dem dreiwertigen Actinium, beginnt.

Entsprechend der Auffüllung der 4 f-Schale bei den „Lanthaniden“ wird bei den neuen Elementen offenbar die 5 f-Schale aufgefüllt. Die Vermutung, daß die Reihe schon bei dem dreiwertigen Actinium beginnt, wird hauptsächlich gestützt durch die deutliche Tendenz der höheren Elemente, wieder bevorzugt in den dreiwertigen Zustand überzugehen.

In Analogie zu der Lanthanidenreihe würde diese neue Reihe also als „Actinidenreihe“ zu bezeichnen sein. Das erste 5 f-Elektron würde dann beim folgenden Element, dem Thorium, eingebaut, wobei hier allerdings, stärker noch als bei dem ersten Glied der Lanthaniden, dem Cerium, der vierwertige Oxydationszustand vorherrscht.

Die Abweichungen vom dreiwertigen Zustande bei den Elementen Protactinium, Uran, Neptunium und schon viel schwächer beim Plutonium würden nach dieser Ansicht durch die leichte Abtrennbarkeit von bis zu drei weiteren Elektronen zu erklären sein.

Diese Angaben über die Einordnung der Trans-Urane in eine „Aktiniden“-Reihe werden von *Seaborg* noch mit einer gewissen Zurückhaltung gemacht. Sie scheinen ihm aber doch so begründet, daß die Namen Americium und Curium für die Elemente 95 und 96 plausibel und gut gewählt erscheinen. Das Element 95 enthält nämlich, wenn der Aufbau der 5 f-Schale beim Thorium begonnen hat, sechs 5 f-Elektronen. Diesem entspricht in der

Lanthanidengruppe das Europium mit seinen sechs 4 f-Elektronen. Dem in Europa *Demarc* (von y) entdeckten Europium entspricht also das in Amerika entdeckte Element 95. Deshalb wurde von *Seaborg* der Name Americium dafür vorgeschlagen.

Das Element 96 enthält sieben 5 f-Elektronen und ist dem Gadolinium in der Lanthanidengruppe analog. Gadolinium hat seinen Namen nach dem bekannten Erforscher der seltenen Erden *Gadolin.* Entsprechend wurde für das analoge Element der Actinidengruppe ebenfalls ein Personenname, nämlich der Name Curium gewählt, zu Ehren des Ehepaars *Curie,* den Entdeckern des Radiums.

Beim Curium ist der Schritt vom Unwägbaren zum Wägbaren noch nicht getan. Die Kettenreaktion, die die für den Chemiker hinreichenden Mengen an künstlichen Elementen liefert, wird ja von den Neutronen in Gang gehalten, die bei den Spaltprozessen zusätzlich entstehen und die auch außerhalb der Piles sicher noch in großer Intensität für Anlagerungsreaktionen zur Verfügung stehen. Bei α-Strahlenprozessen ist man vorerst noch auf die zwar im Vergleich zu den natürlichen α-Umwandlungen unvergleichlich viel stärkeren und energiereicheren α-Strahlen des Cyclotrons angewiesen, wobei diese aber wieder unvergleichlich viel schwächeren Strahlenintensitäten entsprechen, als in den Neutronenströmen der Uran-Piles zur Verfügung stehen.

Doch ist damit nicht gesagt, daß in Zukunft nicht noch andere Curium- oder Americium-Isotope gefunden werden. Sollten sich noch Neutronenreaktionen ergeben, die zu langlebigen Curium-Isotopen oder Americium-Isotopen führen, dann würden auch diese Elemente im Laufe der Zeit dem Chemiker zugänglich und wegen ihrer durch die angenommene Langlebigkeit bedingten schwächeren Strahlenintensität auch ohne Gefahr zu handhaben sein.

Vorerst müssen wir aber zufrieden damit sein, daß im Periodischen System jetzt keine leeren Plätze mehr vorhanden sind und daß durch die trans-uranischen Elemente der „Actinidengruppe" das System um nicht weniger als vier neue Elemente erweitert worden ist.

Schlußbemerkung

Ein halbes Jahrtausend alchemistischer Forschung wurde damit verbracht, die Transmutation der chemischen Elemente zu erzwingen.

Durch den Übergang der Forschungsmethoden von der äußeren Elektronenhülle zum inneren Atomkern gelang es vor nun bald dreißig Jahren zum ersten Male, ein Element in ein anderes umzuwandeln. Der Nachweis dafür war nur möglich durch die besonderen Methoden der Kernphysik, mittels deren man die Wirkung einzelner Atome nachweisen kann. An eine Wägbarkeit der umgewandelten Atome war nicht zu denken. —

Mit dem Bau der Riesencyclotrone in U. S. A. wurden dann während des letzten Krieges zum ersten Male wägbare Mengen von Atomen künstlich gewonnen, allerdings auch nur im Ausmaße von Tausendsteln Milligrammen, im günstigsten Falle bis zu einem Milligramm.

Mit der Auswertung der bei der Spaltung des Urans zusätzlich entstehenden Neutronen zu einer gelenkten „Kettenreaktion“ können aber heute Vertreter fast aller chemischen Elemente gramm-, ja unter Umständen kilogrammweise hergestellt werden. Die Lücken im Periodischen System der Elemente wurden geschlossen, die Trans-Urane setzen die Reihe fort. Der lange Weg vom Traum der Alchemisten bis zur gelungenen Transmutation vieler chemischer Elemente in unwägbarer Menge ist zurückgelegt. Der offenbar sehr viel kürzere Weg zur Herstellung künstlicher Elemente in — fast möchte man sagen — beliebigen Mengen ist beschritten.

Wie wird die weitere Entwicklung sein?

Möchten die ungeheuren Möglichkeiten, die mit der Verwertung der Kernumwandlungen verbunden sind, zum Segen der Menschheit und nicht zu ihrer Vernichtung führen.

Otto Hahn, geboren am 8. 3. 1879 in Frankfurt/Main. Studium der Chemie in Marburg und München, Dr.-Examen 1901. Nach zwei Jahren Assistentenzeit und vorübergehendem Aufenthalt in London im Institut von Sir William Ramsay und in Montreal bei Prof. Ernest Rutherford, Habilitation in Berlin am Chemischen Institut der Universität (1907). 1911 Berufung an das neugegründete Kaiser-Wilhelm-Institut für Chemie, Direktor des Instituts seit 1928, Präsident der Kaiser-Wilhelm-Gesellschaft (jetzt: Max-Planck-Gesellschaft) zur Förderung der Wissenschaften seit 1. 4. 1946. Nobelpreis für Chemie 1944.